



Universidad
Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera

Optimización de Vehículos Eléctricos de Rango Extendido

Autor/es

Víctor Júdez Gíl

Director/es y/o ponente

Mariano Muñoz Rodríguez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza
2011/2012

Optimización de Vehículos Eléctricos de Rango Extendido RESUMEN

El objetivo de este estudio es elaborar una metodología para optimizar el tamaño de la batería (energía almacenada) y del extensor de rango (potencia máxima) aplicable a diferentes tipos de Vehículo Eléctricos de Rango Extendido.

Los vehículos eléctricos se presentan como una solución prometedora a los problemas con los que se enfrenta el sector de transporte. Debido a su alta eficiencia los vehículos eléctricos son capaces de reducir considerablemente las emisiones locales y globales, así como reducir la dependencia que el transporte tiene de los limitados y cada vez más costosos combustibles fósiles. Sin embargo los vehículos eléctricos presentan problemas importantes. La mayor parte de estos problemas derivan del alto precio y baja densidad energética que presentan actualmente las baterías, lo que conlleva a autonomías eléctricas no suficientes para la mayoría de los conductores.

Para superar las deficiencias actuales de los vehículos eléctricos y acelerar la electrificación del automóvil los Vehículo Eléctricos de Rango Extendido pueden ser una solución atractiva. En estos vehículos se añade un motor térmico (extensor de rango) al tren de potencia de un vehículo eléctrico, el cual es capaz de recargar las baterías cuando la carga de estas ha sido totalmente consumida. La adición del extensor de rango elimina las limitaciones de autonomía que presentan los vehículos eléctricos y además permite ajustar el tamaño de la batería a la distancia típica recorrida diariamente, reduciendo por lo tanto el coste total del vehículo.

Este estudio se ha centrado en analizar los patrones de conducción de los conductores para analizar que características influyen en el tamaño óptimo de la batería de del extensor de rango. Para ello se ha hecho uso de una amplia base de datos de conducción de vehículos. Así mismo se ha adaptado un método de optimización convexa para su utilización en el control y simulación de Vehículos Eléctricos de Rango Extendido. Los resultados del estudio muestran que el tamaño óptimo de la batería es fuertemente dependiente del precio de esta y de la distancia recorrida diariamente, la cual varía según el segmento de mercado sobre el que fijamos el estudio. El tamaño del extensor de rango debe decidirse según las prestaciones deseadas para el vehículo en trayectos largos, debiendo prestar especial atención a los requerimientos esperados en zonas montañosas.

El proyecto demuestra que los Vehículos Eléctrico de Rango Extendido son una buena solución para reducir el consumo de combustible, siendo posible reducir el 70 % de uso de combustible con rango eléctricos reducidos (50-70km). Además estos vehículos podrían ser validos para un mayor porcentaje de conductores al no presentar limitaciones de autonomía y ser más competitivos en comparación con los vehículos eléctricos actuales.

Contenido

1.	Introducción	5
1.1.	Contexto	5
1.2.	Motivación y trabajos relacionados	6
1.3.	Objetivo y alcance del proyecto	7
1.4.	Organización de la memoria	7
2.	El Vehículo Eléctrico de Autonomía Extendida.	9
2.3.	Definiciones	9
	Vehículo híbrido:	9
	Vehículo híbrido eléctrico enchufable (PHEV):	9
	Vehículo eléctrico de baterías (BEV):	9
2.4.	Vehículo híbrido serie	9
2.5.	Vehículo Eléctrico de Autonomía Extendida (REV).	11
3.	Análisis de los patrones de uso de los vehículos.....	13
3.1.	Ciclos de conducción para homologación.....	13
3.2.	Base de datos en patrones de conducción.	13
3.2.1.	Test Site Sweden (TSS)	14
3.2.2.	Distancia recorrida diariamente.....	15
3.3.	Los ciclos de conducción ARTEMIS.....	19
3.4.	Método para optimizar Vehículos Eléctricos de Rango Extendido.	21
3.4.1.	Simulación y control del tren de potencia de un vehículo híbrido.	21
3.4.2.	Aplicación del método de optimización convexa a REV.....	22
4.	Diseño del tren de potencia de un vehículo eléctrico de rango extendido	25
4.1.	Requerimientos de potencia por parte del motor eléctrico.	25
4.2.	Dimensionamiento del motor combustión-generator.....	29
4.2.1.	Efecto de la velocidad media.	29
4.2.2.	Efecto de las pendientes	31
4.2.3.	Otros efectos	31
4.2.4.	Estrategias de operación inteligentes.	32
4.2.5.	Tamaño a seleccionar.....	33
4.3.	Dimensionamiento de la batería.....	34
4.3.1.	Porcentaje de kilómetros conducidos eléctricamente.	34

4.3.2.	Ratio Potencia-Energía	37
4.3.3.	Precio de la batería.....	39
5.	Optimización de costes	40
6.	Comparación del tamaño optimo de batería para los 2 tipos de vehículos.	42
6.3	Definición de los nichos de mercado.	42
6.3.4	Vehículo urbano	42
6.3.5	Vehículo de pasajeros para cualquier uso.....	42
6.3.6	Patrones de conducción para los dos tipos de vehículos.....	42
6.4	Comparación de ambos vehículos	44
7.	Consumos de combustible y autonomía.....	48
7.3	Consumo combustible en modo mantenimiento de carga (l/100km).....	48
7.4	Consumo energético en modo puramente eléctrico (kWh/km) → Rango eléctrico (km)	49
7.5	Consumo combinado. Procedimiento Europeo híbridos.	49
8.	Comparación entre BEVs y REVs	52
9.	Conclusiones y líneas futuras	55
9.3	Conclusiones.....	55
9.4	Líneas futuras	56
10.	Bibliografía	57

1. Introducción

1.1.Contexto

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto FUEREX: Multi-fuel Range Extender with high efficiency and ultra-low emissions [1]. El proyecto esta cofinanciado por el Séptimo Programa Marco de la Comisión Europea y esta formado por un consorcio de 8 organizaciones (fabricantes de vehículos, proveedores, institutos de investigación y universidades). FUEREX tiene como objetivos:

1. Desarrollar 3 motores de encendido por chipa para su utilización como extensores de rango.



Figura 1. 3 motores candidatos a desarrollar.

2. Desarrollo de capacidades multi-fuel. Todos los motores serán optimizados para al menos un tipo de biofuel (bio etanol, bio gas, mezclas de biogás/hidrogeno) y al menos un combustible convencional (gasolina, CNG).
3. Integración de los extensores de rango en vehículos eléctricos de baterías.
4. Demostración y validación de la tecnología integrada mediante 3 vehículos prototipo.

Los vehículos seleccionados dentro de FUEREX, nombrados de izquierda a derecha en la Figura 2, son:

- Furgoneta de distribución (Iveco Daily).
- General purpose passenger car (Volvo C30).
- Vehículo de pasajeros enfocado a ambientes urbanos (Mini Cooper).



Figura 2. 3 Vehículos en FUEREX

Chalmers University of Technology es la responsable dentro del proyecto de los estudios a nivel del vehículo. Los objetivos concretos del paquete de trabajo que lidera Chalmers son:

- Crear ciclos de conducción adecuados para Vehículos Eléctricos de Rango Extendido.
- Definir estrategias de control y dimensionamiento del Extensor de Rango.
- Comparar los 3 vehículos seleccionados y sus tamaños óptimos de batería.

Este proyecto ha intentado responder a algunas de las cuestiones planteadas anteriormente. Los objetivos concretos del estudio son expuestos en el apartado 1.3.

1.2.Motivación y trabajos relacionados

Mundialmente existe una fuerte tendencia hacia la mejora de eficiencia y reducción de emisiones por parte del sector del transporte en general y de los vehículos de pasajeros en particular. En Europa en concreto una ley aprobada en 2008 fuerza a los fabricantes de automóviles a reducir las emisiones medias de sus nuevos vehículos a 130gr/CO₂ para 2015 y propone una reducción de hasta 95 gr/CO₂ para 2020. A estos requerimientos medioambientales se suma la escalada en el precio de los carburantes y la fuerte dependencia que el sistema de transporte tiene de ellos.

Los vehículos eléctricos se presentan como una solución prometedora a los problemas anteriormente mencionados. Estos vehículos son capaces de reducir al 100 % las emisiones locales al propulsarse haciendo únicamente uso de energía eléctrica y aunque no hay que olvidar que la energía eléctrica utilizada por estos vehículos proviene en muchos casos de combustibles fósiles, varios estudios [1][2] han demostrado que las emisiones de CO₂ totales (well-to-wheel) son aproximadamente la mitad que las de un vehículo convencional.

Sin embargo los vehículos eléctricos puros presentan cuatro desventajas importantes comparados con los vehículos convencionales: autonomía, tiempo de recarga, peso y coste. Todos estos problemas están relacionados con la tecnología de baterías. En primer lugar el precio de las baterías todavía es demasiado alto lo que hace que sea necesario reducir la autonomía (tamaño de la batería) para mantener contenido el coste del vehículo. En segundo lugar la densidad energética (kWh/kg) de estas es reducida, lo que hace que el peso total del vehículo se vea incrementado por la adición de baterías. Ambos factores afectan de una manera decisiva al rango eléctrico o autonomía del vehículo que se ve limitada en los modelos actuales a valores en torno a 160 km en condiciones favorables de conducción. Por último la recarga de la batería también representa una limitación importante. La infraestructura de recarga no está desarrollada y los tiempos de recarga son demasiado largos, lo que fuerza a limita en la mayoría de los casos a recarga el vehículo al finalizar el día en el hogar del propietario.

Los vehículos eléctricos de rango extendido se presentan como una solución prometedora para acelerar la electrificación del automóvil. Añadiendo un extensor de rango (motor de combustión + generador) al vehículo eléctrico es posible reducir el tamaño de la batería, y por lo tanto su coste, adecuando el rango eléctrico a la distancia recorrida diariamente. La gran

mayoría de días el rango eléctrico del vehículo será suficiente para completar la distancia recorrida, mientras que para viajes más largos de lo habitual el extensor de rango se encarga de recarga la batería permitiéndonos continuar nuestro viaje más allá del rango eléctrico del vehículo, eliminando las limitaciones de autonomía que presentan los vehículos eléctricos puros.

1.3. Objetivo y alcance del proyecto

Los principales objetivos del proyecto son:

- Proponer un método para la optimización del tren de potencia de Vehículos Eléctricos de Rango Extendido.
- Estudiar el tamaño óptimo de batería para dos tipos de Vehículos Eléctricos de Rango Extendido para dos tipos de vehículos.
- Estudiar el tamaño óptimo del Extensor de Rango en función de las distintas situaciones de conducción.

Para ello se pretende investigar cuales son los factores principales que afectan en el dimensionamiento de la batería y extensor de rango en Vehículo Eléctrico de Rango Extendido. El proyecto centra su atención en el estudio de los patrones de conducción de los conductores, poniendo especial énfasis en la distancia recorrida diariamente por los usuarios. Otros factores como la previsible reducción del precio de las baterías son incluidos en la optimización, sin embargo no se ha estudiado la influencia de factores como el precio de los combustibles fósiles o de la energía eléctrica. El método ha sido aplicado a dos vehículos ejemplo, un vehículo de uso general y un vehículo urbano, los cuales quieren representar dos importantes nichos de mercado dentro de los vehículos de pasajeros. Durante el estudio también se realiza un análisis de cuál es el posible potencial de reducción de combustible que estos vehículos y su posible aceptación por parte de los consumidores.

Es importante remarcar que el objetivo del proyecto no es comparar los Vehículos Eléctricos de Rango Extendido con los vehículos convencionales, sino la propia optimización del tren de potencia de estos vehículos.

1.4. Organización de la memoria

La memoria consta de 8 secciones principales las cuales están organizadas de una manera lógica empezando por las definiciones necesarias, el análisis de los patrones de conducción y descripción de la metodología utilizada, pasando por la muestra de resultados y realización de comparaciones para finalizar con las conclusiones y líneas futuras de trabajo. Los contenidos de cada sección son los siguientes:

En el segundo apartado se describen los conceptos de vehículo híbrido serie y vehículo eléctrico de rango extendido.

Posteriormente en el apartado 3 se estudian los patrones de conducción y se define el método con el que se realizarán los diferentes estudios y optimizaciones del tren de potencia del vehículo.

En La sección 4, denominada “Diseño del tren de potencia” se explican los principales mecanismos que dimensionan tanto el extensor de rango como la batería en un vehículo eléctrico de rango extendido, pretendiendo ser esta sección una guía del diseño de los Vehículo Eléctricos de Rango Extendido.

En la sección 5 se describe la optimización de costes con la que se elige el tamaño óptimo de batería, para posteriormente en la sección 6 “Comparación del tamaño optimo de batería para dos tipos de vehículos” realizar una comparación de los resultados para un vehículo destinado a su uso urbano y un vehículo concebido para cualquier uso.

En el apartado 8 se realiza una comparación principalmente cualitativa entre los vehículos eléctricos de rango extendido y los vehículos eléctricos puros. Por último en el apartado 9 se exponen las conclusiones que se pueden derivar del estudio y propone futuras líneas de investigación para continuar el trabajo realizado.

2. El Vehículo Eléctrico de Autonomía Extendida.

En esta sección se van a explicar en profundidad los conceptos de vehículo híbrido serie y de vehículo eléctrico de autonomía extendida. En la sección 2.3 también se definen otras topologías de vehículos nombradas con frecuencia a lo largo del estudio.

2.3. Definiciones

Vehículo híbrido: Según la definición de vehículo híbrido dada por la SAE (Society of Automotive Engineers):

Híbrido es todo aquel vehículo que se pueda impulsar con dos o más fuentes diferentes de potencia ya sea de forma conjunta o independientemente.

En concreto en los **vehículos híbridos eléctricos (HEV)** el tren de potencia está compuesto por un motor de combustión, uno o más máquinas eléctricas y un almacenador de energía, típicamente una batería pero pudiendo ser también un supercapacitor. Dependiendo de su diseño los HEVs pueden operar en serie, paralelo o serie-paralelo. Para una detallada descripción de los vehículos híbridos y sus distintas configuraciones, ver [4].

Vehículo híbrido eléctrico enchufable (PHEV): Los denominados PHEV son HEV que además disponen de la posibilidad de recargar la batería mediante su conexión directa a la red eléctrica.

Vehículo eléctrico de baterías (BEV): Vehículos propulsados por uno o más motores eléctricos. En el caso de un BEV la energía es suministrada por una batería que es recargada mediante su conexión a la red eléctrica.

2.4. Vehículo híbrido serie

En un vehículo híbrido serie las ruedas son propulsadas por uno o más motores eléctricos, mientras que la electricidad demandada por este motor eléctrico puede ser suministrada por una batería o por un motor térmico unido a un generador eléctrico. El generador eléctrico convierte la energía mecánica proveniente de motor de combustión en energía eléctrica, la cual puede ser usada tanto para alimentar directamente el motor eléctrico como para recargar la batería. Debido a que no existe conexión mecánica entre el motor de combustión y las ruedas, el punto de operación de este puede ser elegido independientemente de la velocidad y la demanda de par del vehículo, y el motor de combustión puede ser controlado para operar en la zona de máxima eficiencia. Las prestaciones del vehículo (en términos de aceleración, máxima pendiente y velocidad máxima) son determinadas por el tamaño y características del motor eléctrico. Este motor de tracción también puede ser utilizado como generador permitiendo regenerar energía mientras frenamos para volverla a almacenar en la batería.

En la Figura 3 se puede observar el esquema del tren de potencia de un vehículo híbrido serie.

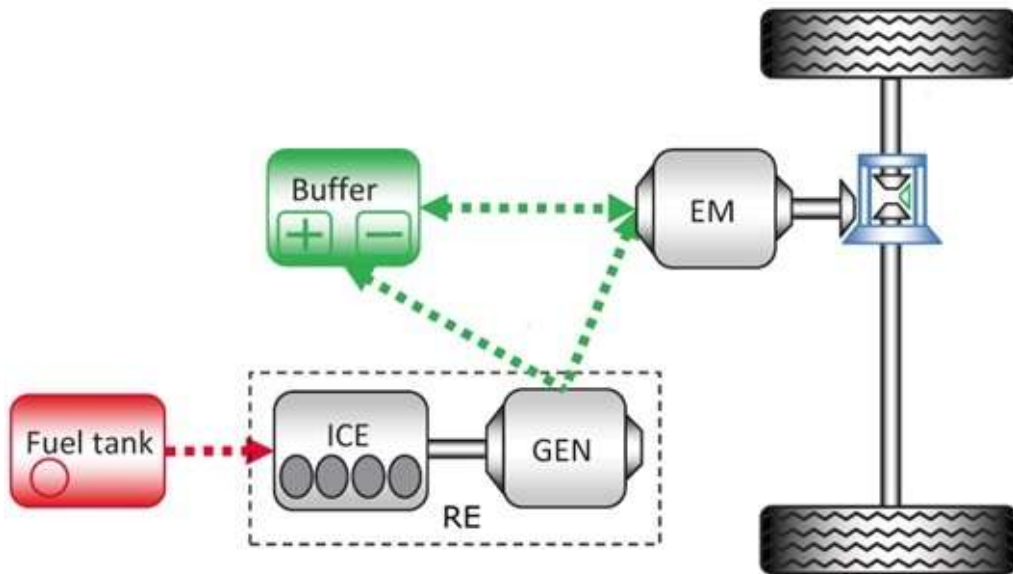


Figura 3. Vehículo híbrido serie.

Aunque pueda resultar novedoso, el concepto de vehículo híbrido serie no es nuevo: el famoso ingeniero Ferdinand Porsche creó, hace más de 100 años, el que para muchos es el primer vehículo híbrido serie. El vehículo en cuestión fue bautizado por el propio ingeniero como 'Semper Vivus' (siempre vivo) ya que el uso de un motor de combustión generando electricidad significaba que el vehículo no era inoperable cuando las baterías estaban completamente descargadas [7].

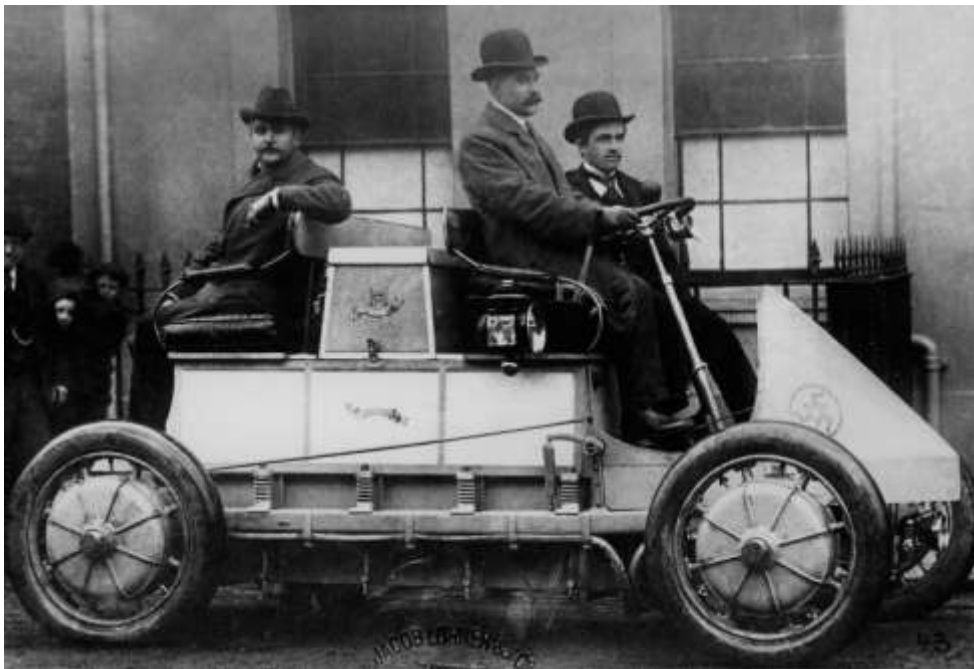


Figura 4. Primer híbrido serie: Semper Vivus diseñado por Ferninand Porsche.

2.5. Vehículo Eléctrico de Autonomía Extendida (REV).

La principal diferencia entre un vehículo híbrido serie y el llamado REV es que en este último existe la posibilidad de conectar el vehículo directamente a la red eléctrica y de esta manera cargar las baterías. Ello hace que el tamaño (energía almacenada) de la batería se vea aumentado, ya que ahora no solo se encarga de proporcionar potencia eléctrica, sino que además se convierten en un almacén de energía del mismo modo que lo es el combustible. En un vehículo híbrido serie (no enchufable) toda la energía proviene del combustible, mientras que en un REV disponemos de dos reservas de energía a nuestra disposición: el combustible fósil y la energía química que almacena la batería proveniente directamente de la red eléctrica. En la Figura 5 se muestra el tren de potencia de un REV, el cual es idéntico al mostrado en la Figura 3 añadiendo la posibilidad de recargar la batería conectándola a la red eléctrica.

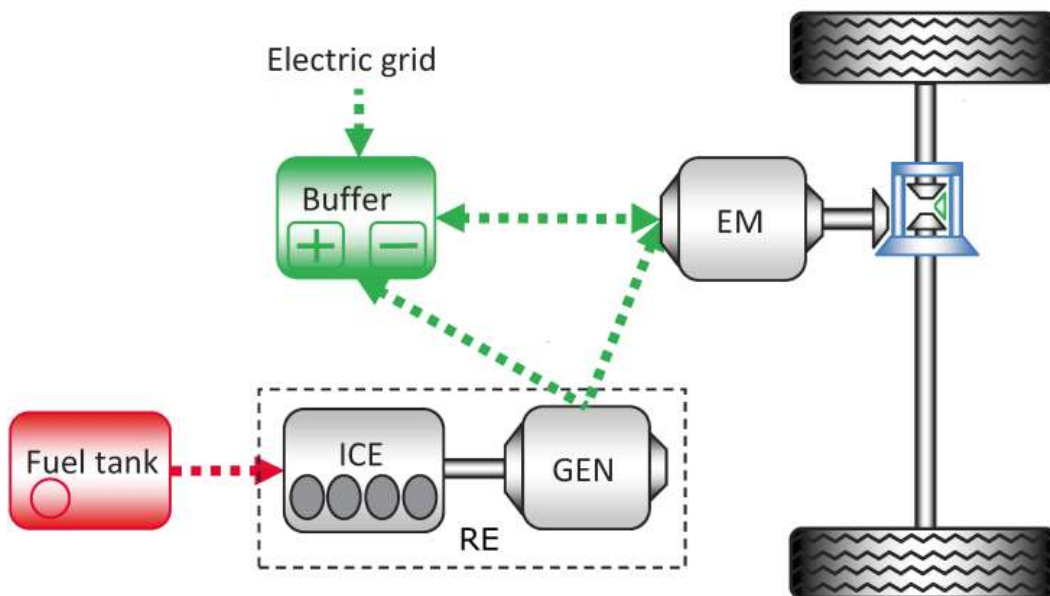


Figura 5. Tren potencia vehículo eléctrico de autonomía extendida.

Mucho ha sido discutido acerca la denominación de este tipo de vehículos. Si nos ceñimos a la definición de vehículo híbrido estos bien podrían ser considerados PHEVs, sin embargo ciertos sectores de la industria se ha querido hacer una distinción, muy probablemente por razones de marketing, entre los llamados híbridos enchufables (PHEVs) y los vehículos eléctricos de rango extendido (REVs).

Las razones esgrimidas están relacionadas con la capacidad del vehículo en un modo totalmente eléctrico. En un REV el motor eléctrico es el único que proporciona potencia a las ruedas y el vehículo es capaz de alcanzar todas sus prestaciones en un modo puramente eléctrico. En un PHEV sin embargo, el motor de combustión tiene una conexión directa a las ruedas y las máximas prestaciones solo se consiguen cuando ambos motores (eléctrico y de combustión) proporcionan potencia a las ruedas.

De esta manera el tren de potencia de un REV puede ser visto como un BEV al que se le añade un motor de combustión con el que extender la autonomía proporcionada por las baterías. La gran mayoría de los días dispondremos de un vehículo eléctrico, ya que la autonomía eléctrica que proporciona la batería será suficiente para completar nuestra conducción diaria, y solo en los días en que realicemos viajes más largos será necesaria la utilización del motor de combustión.

Al conjunto tanque de gasolina, motor de combustión más generador se le denomina habitualmente extensor de rango (RE).

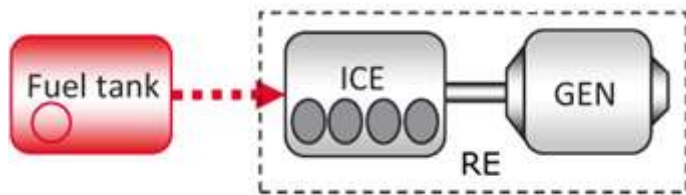


Figura 6. Extensor de Rango (RE)

Si comparamos el tren de potencia de un REV mostrado en la Figura 5 con el de un BEV representado en la Figura 7 se puede observar como partiendo de un BEV podemos obtener un REV mediante la integración del llamado extensor de rango (Figura 6), aumentando de esta manera la autonomía total del vehículo.

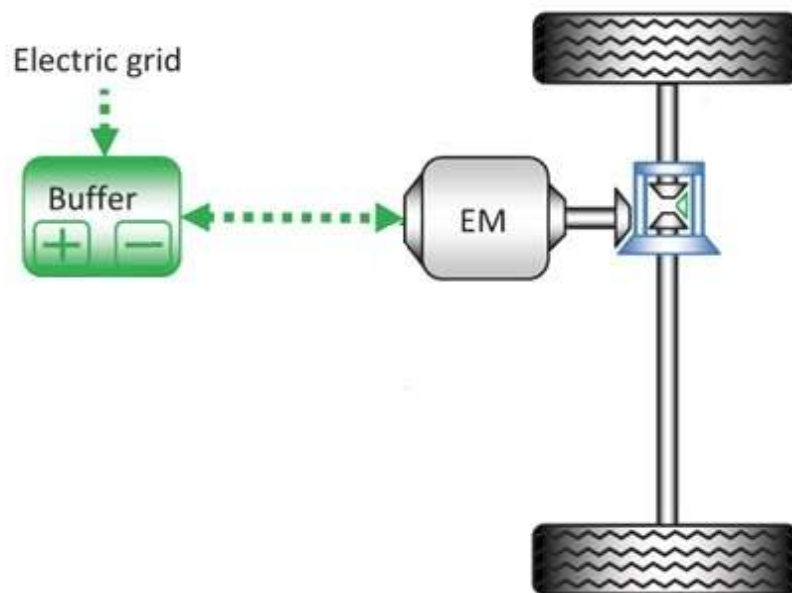


Figura 7. Vehículo eléctrico a baterías.

3. Análisis de los patrones de uso de los vehículos.

Para optimizar el diseño de los Vehículo Eléctricos de Rango Extendido es fundamental conocer como los usuarios utilizan sus vehículos en condiciones de conducción reales. Para ello es necesaria la realización de bases de datos con las que poder analizar cuáles son los patrones de uso de los vehículos que afectan al diseño óptimo del tren de potencia.

3.1. Ciclos de conducción para homologación.

Los ciclos estándar de conducción como el New European Driving Cycle (NEDC) o el Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) han sido tradicionalmente usados para representar y comparar consumos y emisiones medias entre distintos vehículos. Sin embargo estos ciclos carecen de información acerca de la distancia recorrida entre paradas, o la posibilidad de recargar la batería, la cual es fundamental para un PHEV o REV.

En los vehículos híbridos enchufables disponemos de dos fuentes de energía para propulsar el vehículo: la energía eléctrica almacenada en la batería y la energía química almacenada en el combustible fósil. Con los precios actuales de la energía eléctrica y de los combustibles fósiles el kilometro conducido eléctricamente es más barato que el kilómetro conducido con combustibles fósiles. Por ello para PHEVs en general y REVs en particular es fundamental conocer no solo el consumo del vehículo sino también cual es la fracción de los kilómetros totales que el vehículo recorre eléctricamente (el resto serán recorridos con la energía proveniente del combustible), la cual queda determinada por la distancia recorrida entre recargas de la batería.

Además de ello, los ciclos de conducción usados para optimización y diseño de vehículos no pueden limitarse a describir el uso típico del vehículo, sino que deben cubrir todos los posibles usos del vehículo con suficiente detalle. El objetivo de los ciclos de conducción de conducción para homologación es el de fijar un estándar con el que comparar distintos vehículos, sin embargo si el objetivo es el de optimizar el diseño debemos asegurar que el vehículo será capaz en todas las condiciones de uso y no solo en su uso típico.

3.2. Base de datos en patrones de conducción.

Para optimizar el diseño y simular es necesario conocer y entender como los vehículos son utilizados en el mundo real. Con la introducción de PHEV y EV, diferentes estudios [5] acerca de la distancia que los vehículos recorren diariamente y de cuándo y por cuánto tiempo estos permanecen aparcados han sido llevados por distintas organizaciones e institutos de investigación. Estas bases de datos permiten entender cuáles son los patrones de conducción de los conductores para diseñar de una manera más eficiente tanto vehículos como

infraestructuras de recarga. En este estudio se ha hecho uso de una base de datos de vehículos conducidos en Suecia.

3.2.1. Test Site Sweden (TSS)

Test Site Sweden [6] es un recurso Sueco para la demostración y validación de investigaciones en el campo de la automoción. TSS proporciona herramientas y entornos para el testeo de vehículos con el objetivo de desarrollar medios de transporte cada vez más sostenibles, con un especial interés en:

- Seguridad activa
- Vehículos eléctricos e híbridos
- Sistemas inteligentes de transporte

Con el objetivo de apoyar a diferentes institutos y proyectos de investigación, TSS ha construido una base de datos de datos que tiene como objetivo que necesitan conocer la manera en que los conductores utilizan sus vehículos para diseñar la movilidad del futuro. La base de datos contiene información de 500 vehículos convencionales conducidos en la costa Oeste de Suecia, llegando a recorrer más de 73000 viajes individuales y aproximadamente 700.000 km.

De cada viaje individual la base de datos contiene información sobre la distancia, velocidad media del viaje y pausas antes y después del viaje. En la Tabla 1 se encuentra un ejemplo de cuál es la información disponible en la base de datos.

Project	Device	Average velocity (km/h)	Distance (km)	Duration (s)	Final velocity (km/h)	Pause before (s)	Pause after (s)	Start time	Stop time
	GeM ElectricDevice023	16.7	6.368	1375	0.0	0.0	3993.0	2011-10-27 09:32:03	2011-10-27 09:54:59
	GeM ElectricDevice023	17.7	2.817	573	15.7	3993.0	4334.0	2011-10-27 11:01:32	2011-10-27 11:11:05
	GeM ElectricDevice023	22.8	4.801	757	0.1	4334.0	3470.0	2011-10-27 12:23:19	2011-10-27 12:35:57

Tabla 1. Ejemplo base de datos.

Se espera que para próximos proyectos se encuentre también disponible información acerca del perfil de velocidad exacto de cada viaje, posiciones GPS del vehículo en cada momento e información adicional como el modelo de vehículo o la localización del hogar de los propietarios.

A partir de ahora todos los datos y gráficos presentados han sido creados haciendo uso y la base de datos anteriormente descrita.

3.2.2. Distancia recorrida diariamente

Todos los viajes registrados en la base de datos descrita en 3.2.1 pueden ser fácilmente representados en una distribución de distancias recorridas. La Figura 8 representa la distribución acumulada de viajes individuales. En otras palabras: Que distancia recorren los vehículos entre paradas.

Para construir la figura se ordenan todos los viajes registrados en función de la distancia (de menor a mayor) y se añade un contador que nos indica en qué posición (%) dentro del total del total de viajes se encuentra el viaje en cuestión. Es necesario remarcar que para la construcción de la base de datos se considera que comienza un nuevo viaje cuando el vehículo ha estado apagado (no contacto) más de 10 segundos.

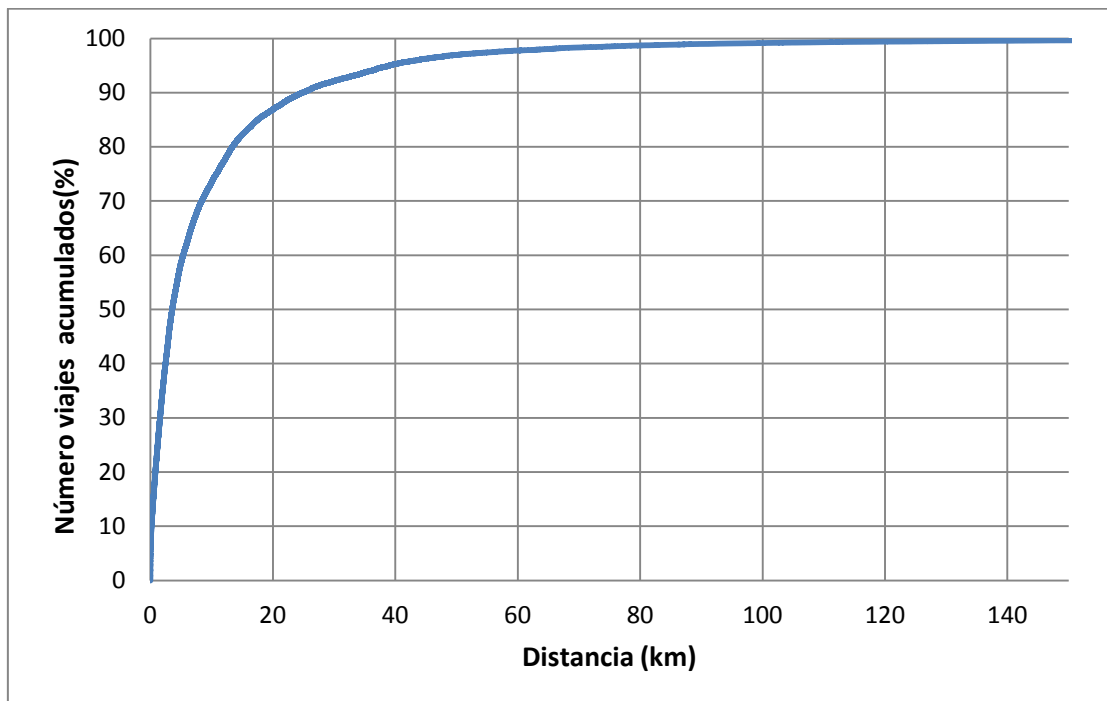


Figura 8. Distribución acumulada de viajes individuales.

En la Figura 8 se puede ver como para la gran mayoría de viajes la distancia recorrida está por debajo de los 20 km. En concreto los viajes de una distancia igual o menor a 23 km representan el 90% de viajes totales. Este resultado podría llevar a la conclusión que tamaños de baterías realmente pequeños y por lo tanto rangos eléctricos muy reducidos (en el orden de los 20 km) podrían cubrir la mayoría de nuestros viajes diarios.

Sin embargo, la distribución de viajes individuales puede no ser el mejor indicador del rango necesario para REVs. Muchos de los viajes presentan tiempos de parada entre ellos no suficientes para recargar la batería y por lo tanto el siguiente viaje tendrá que ser realizado con la carga disponible después del viaje anterior. Incluso si el tiempo de parada es

suficientemente largo para cargar la batería, es posible que no haya un punto de recarga disponible y la recarga se tenga que realizar al concluir el día en un punto de recarga particular. Esta suposición será especialmente cierta durante los primeros años de implementación, ya que en estos momentos la infraestructura de recarga es todavía limitada y los vehículos deberán ser principalmente recargados al final del día en la casa de los propietarios. Incluso cuando la infraestructura de recarga este más consolidada la gran mayoría de las recargas se realizarán al final del día al llegar al hogar o garaje del propietario. Esta tendencia estará provocada por varias razones:

- Para los viajes por encima del rango eléctrico disponemos del extensor de autonomía, el que nos da la libertad de hacer largos recorridos sin tener que parar a recargar la batería. Los descansos que deben ser hechos durante un viaje largo no son suficientes para recargar la batería, y por lo tanto la mayoría de recargas se realizarán al finalizar el viaje.
- Otra razón será el previsible mayor precio de energía eléctrica al recargar en las estaciones instaladas en la vía pública o parkings públicos. La empresa propietaria de las estaciones de recarga tiene unos gastos de instalación iniciales y unos gastos de mantenimiento más adelante, casi inexistentes para un particular. Además si se trata de una empresa privada su razón de ser es el de tener beneficios hará que el precio sea más elevado que la tarifa eléctrica del usuario. Esto hará que muchos de los días en los que la autonomía eléctrica es suficiente para completar el recorrido el usuario prefiera esperar a recargar de una forma más barata en su instalación particular.

Debido a las razones anteriormente expuestas en este estudio se ha considerado como escenario base que el vehículo será cargado diariamente durante la noche. Bajo este supuesto se realizará la optimización del tamaño de batería en los apartados 10 y 5.

Todos los viajes registrados en la base de datos han sido agrupados en días, acumulando la distancia recorrida en cada viaje en un valor de distancia recorrida diaria. La Figura 9 muestra la distribución acumulada de la distancia recorrida diariamente. En esta ocasión el 90% de los días se recorren 100 km o menos, distancia considerablemente mayor que los 23 km necesarios para acumular el 90% de viajes. Se puede observar también que el 70 % de los días la distancia recorrida es igual o menor a 50 km.

Dejando a un lado los valores exactos mostrados en estas graficas, los cuales pueden cambiar fácilmente dependiendo de factores como la localización geográfica de los vehículos o del tipo de vehículos representados, es importante poner atención en la variabilidad que podemos encontrar entre distintos conductores. Cuando se trabaja con bases de datos y estadísticas es necesario poner atención no solo a los valores medios, sino también a la variabilidad y diferencias que se pueden encontrar dentro de la gran cantidad de datos. Por ello en la Figura 10 se ha representado la distancia diaria recorrida para distintas partes de la base de datos. En primer lugar se ha representado la distancia recorrida para el 10% de vehículos que recorren distancias más largas y más cortas (funciones morada y roja respectivamente). Además de eso se han representado la misma distribución para 3 conductores individuales.

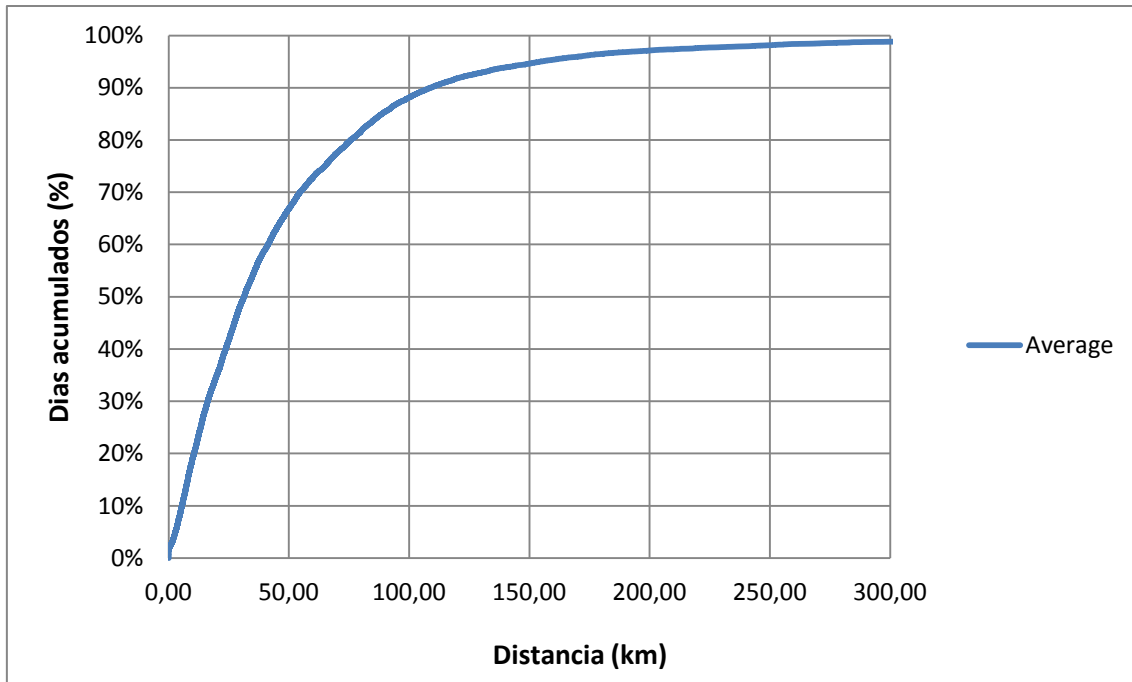


Figura 9. Distribución distancia recorrida diariamente.

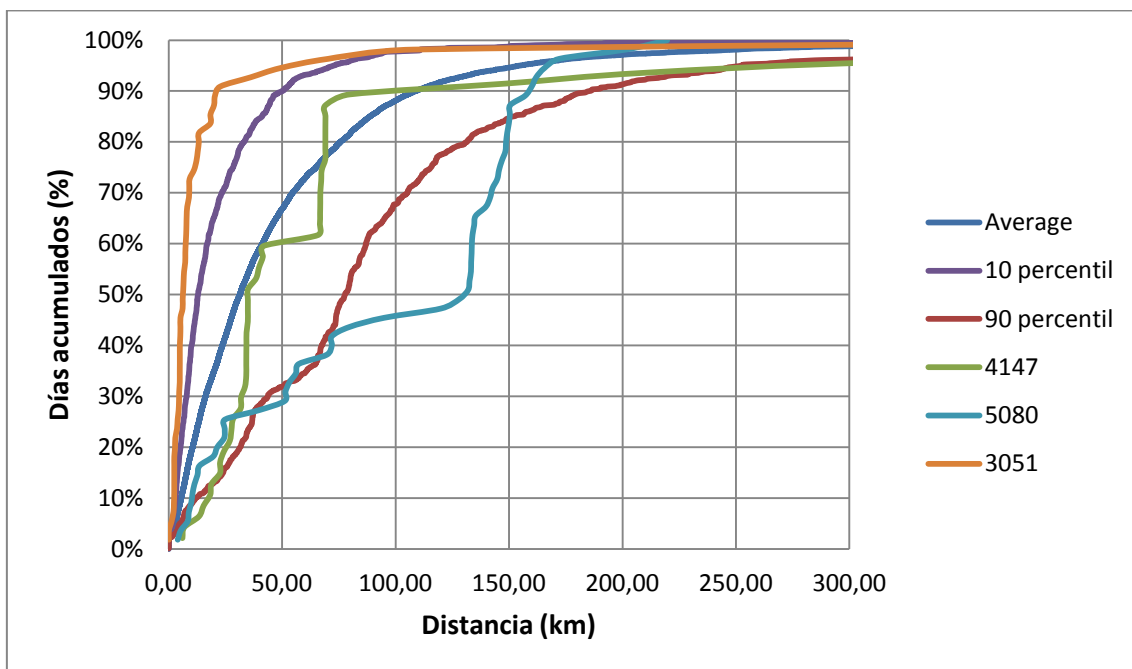


Figura 10. Variabilidad de la distancia diaria recorrida.

En la figura anterior se puede observar que para completar el 70% de los días en el caso del 10% de conductores que conducen viajes más cortos es necesario un rango eléctrico de tan solo 25 km, la mitad que para la media de todos los conductores. Si por el contrario nos fijamos únicamente en el 10% de conductores que conducen viajes más largos la distancia se dobla respecto a la media, necesitando un rango eléctrico de más de 100 km para completar el mismo 70% de días totales.

Si indagamos todavía más en la base de datos se observa que las curvas que representan vehículos individuales presentan formas muy distintas que aquellas que engloban un gran número de conductores. Los saltos que se pueden observar en las curvas de los conductores individuales se deben a que para un conductor individual ciertos viajes se repiten con mucha más frecuencia que otros.

El objetivo final de este trabajo es elegir el tamaño de baterías y motor-generator que ofrecen un menor coste total al usuario o propietario del vehículo. Como se ha mostrado en la Figura 10 distintos conductores presentan distintas distribuciones en la distancia diaria recorrida. Por lo tanto si quisiéramos minimizar el coste total de propiedad para cada conductor individual esto nos llevaría a un diseño o configuración distinta para cada usuario. Sin embargo este grado de personalización no es viable económicamente desde un punto de vista industrial, y por ello es necesario determinar un número limitado de configuraciones que satisfagan al mayor número posible de usuarios. Por ello es importante clasificar a los distintos conductores dependiendo de las características de conducción compartidas para de esta manera satisfacer al mayor número de conductores posibles con un número limitado de tamaños de batería.

Desde el punto de vista psicológico del conductor el número de días en que este conduce su vehículo de una manera totalmente eléctrica, y por tanto no es necesario utilizar el motor de combustión, puede llevar a la idea de 'tengo un vehículo eléctrico'. Hechos como el no tener que ir a la gasolinera habitualmente o simplemente oír el sonido del motor de combustión en contadas ocasiones pueden ser características que el usuario aprecie de su vehículo y que por lo tanto generen una satisfacción o sensación de calidad al cliente. Sin embargo si nos ceñimos a un pensamiento puramente racional, entendiendo racional como económico, lo que marca la economía de nuestro tren de potencia no es la cantidad de días que podemos conducir sin hacer uso alguno del motor de combustión, sino la cantidad o porcentaje de kilómetros que recorreremos con una y otra fuente de energía. En la sección 4.3.1 se presentará una gráfica representando el porcentaje de la distancia total recorrida que puede ser recorrida con energía eléctrica dependiendo del tamaño de la batería. En las siguientes secciones estos resultados serán traducidos a términos monetarios para poder comparar desde un punto de vista económico la optimalidad del tren de potencia para distintos tamaños de batería.

3.3. Los ciclos de conducción ARTEMIS.

Como ya ha sido comentado anteriormente existe un problema adicional cuando nuestro objetivo es optimizar el diseño de un vehículo. El objetivo principal de los ciclos de conducción que se utilizan para homologación es el de proporcionar unos valores oficiales de consumo y emisiones con los que poder comparar distintos vehículos. Por el contrario para optimizar el diseño del tren de potencia debemos utilizar ciclos de conducción que representen de una manera realista y con suficiente detalle la manera en que los conductores utilizan sus vehículos. Dentro del alcance de este proyecto no estaba el crear nuevos ciclos de conducción, ya que esta es una tarea para la que se necesitan una gran cantidad de recursos. Por ello se decidió hacer uso de los conocidos y contrastados ciclos de conducción ARTEMIS. El objetivo del proyecto Europeo ARTEMIS fue el de desarrollar 3 ciclos de conducción (autopista, carretera rural y entorno urbano) representativos de las condiciones reales de uso de los vehículos y el reproducir la diversidad de condiciones de conducción. Estos ciclos de conducción fueron contruidos haciendo uso de una amplia base de datos y haciendo uso de una metodología que fue ampliamente discutida y aprobada. La información detallada de las bases de datos que fueron utilizadas para construir los ciclos de conducción así como la metodología utilizada puede ser consultada en [7]. En las Figuras Figura 11 y Figura 12 Figura 13 se muestran los perfiles de velocidad de los ciclos urbano, rural y de autopista.

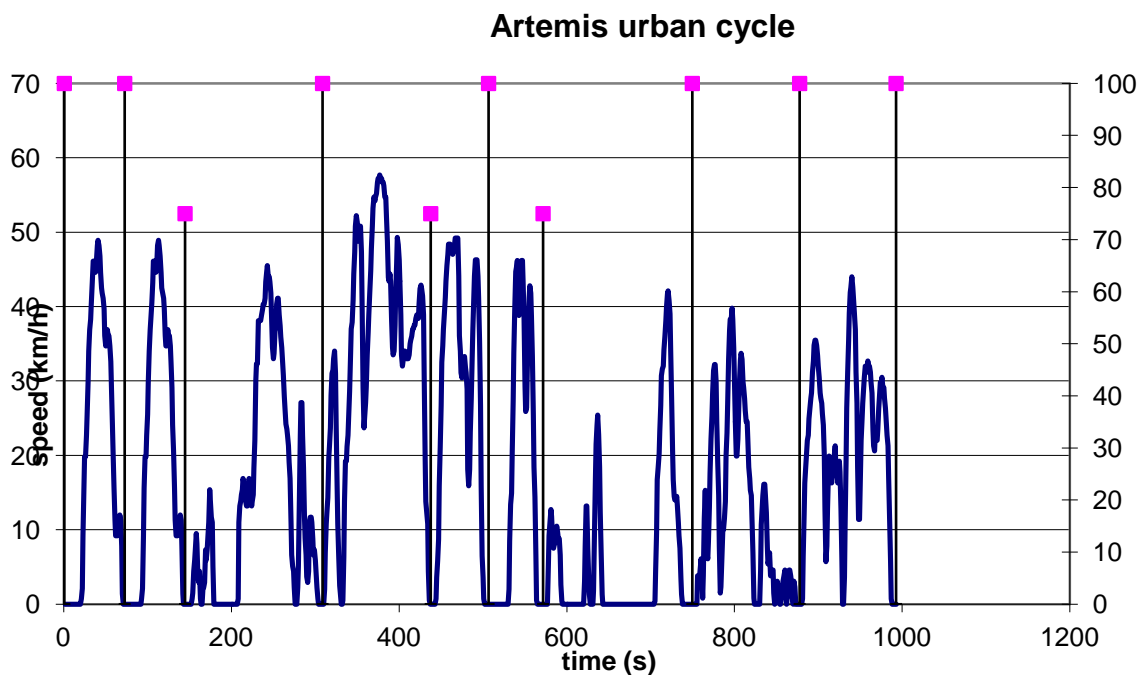


Figura 11. Ciclo Artemis urbano

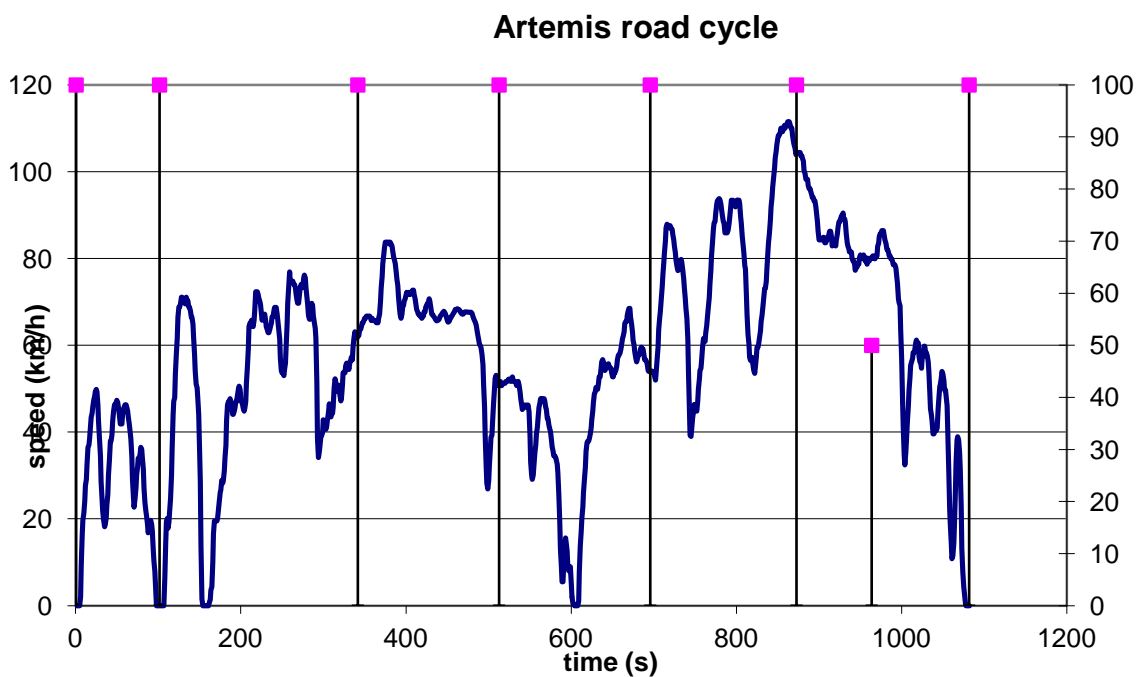


Figura 12. Ciclo ARTEMIS rural

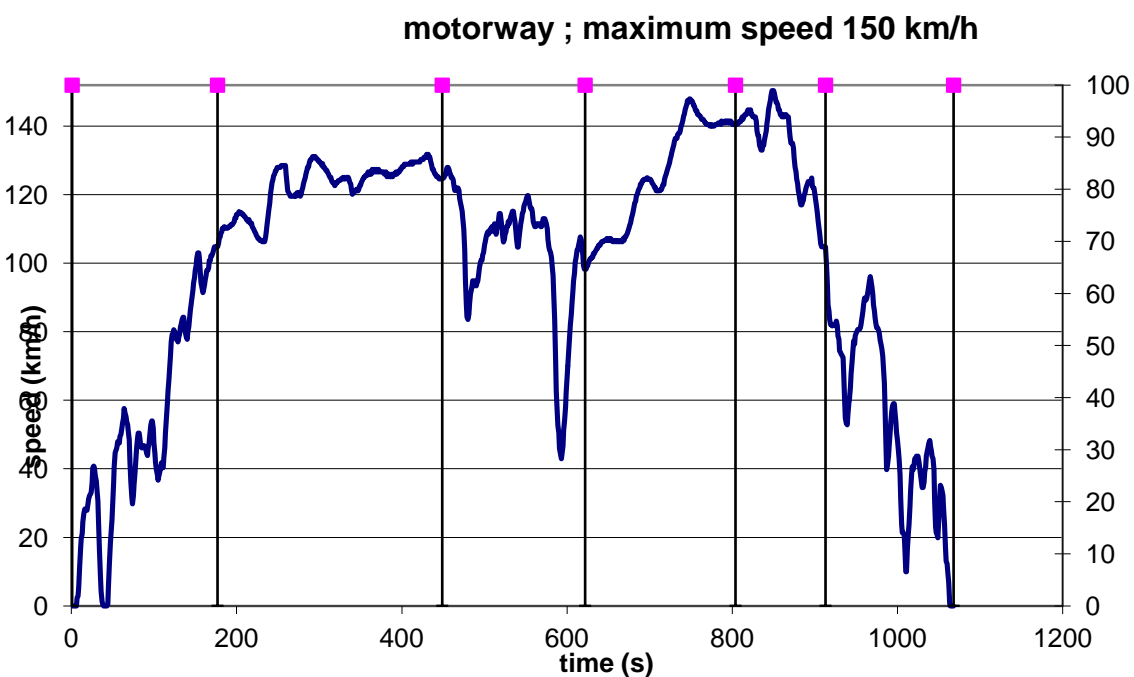


Figura 13. Ciclo ARTEMIS autopista

Los 3 ciclos de conducción en cuestión están disponibles para su descarga y utilización libre en [8].

3.4. Método para optimizar Vehículos Eléctricos de Rango Extendido.

3.4.1. Simulación y control del tren de potencia de un vehículo híbrido.

El problema de simular y controlar un vehículo híbrido se puede abordar mediante dos tipos de métodos. El primer método se basa en algoritmos heurísticos. En la mayor casos se tratan de normas lógicas que deciden según una serie de variables de entrada cual es la distribución de potencia en el tren de potencia en cada instante. Estos métodos presentan como desventaja el que no aseguran que el control óptimo (mínimo consumo) del tren de potencia.

El segundo grupo de métodos son los llamados métodos de control óptimo. Presentan como ventaja la optimalidad del control, lo cual asegura el mínimo consumo posible. La contrapartida de este tipo de métodos es la necesidad de conocer la ruta (ciclo de conducción) para realizar la optimización, lo que hace difícil su implementación en el propio vehículo a tiempo real. Dentro de los métodos de control óptimo, Dynamic Programming (DP) es el más comúnmente usado. La principal ventaja de DP es la capacidad de utilizar modelos no lineares y no convexos de los distintos componentes, pudiendo mezclar en el mismo problema variable continuas y discretas. Sin embargo la principal desventaja de este método es la capacidad de computación necesaria para mantener los tiempos de simulación dentro de límites aceptables, además de la imposibilidad de manejar más de dos variables de simulación si queremos mantener este tiempo contenido.

Con el fin de solucionar los problemas planteados por DP, dentro de Chalmers University of Technology se ha desarrollado un nuevo método de optimización de vehículos híbridos desarrollado en basado en optimización convexa. La principal ventaja de este método es la rapidez en comparación con DP y la posibilidad de manejar varias variables de optimización, pudiendo de esta manera optimizar el tamaño de los distintos componentes dentro del mismo algoritmo de optimización. Sin embargo el método no está exento de desventajas. El principal reto para la aplicación de un método de optimización convexa para el control de un vehículo híbrido es la no convexidad general del problema de optimización. Por ello gran parte del esfuerzo durante el desarrollo del método fue puesto en la convertir el problema de control de un vehículo híbrido en un problema de optimización convexa, realizando las aproximaciones necesarias manteniendo la exactitud en los resultados. En los artículos [9] y [10], se explica detalladamente el fundamento teórico del método así como los distintos pasos para convexizar el problema en cuestión y la definición del problema de optimización. El algoritmo ha sido desarrollado dentro del entorno de programación MATLAB.

Es importante remarcar que este método de optimización convexa no ha sido desarrollado dentro de este estudio, sino que únicamente ha sido adaptado y aplicado para solucionar el problema de optimización del Vehículo Eléctricos de Rango Extendido.

3.4.2. Aplicación del método de optimización convexa a REV.

Como ha sido señalado en el apartado anterior el principal problema que presentan los métodos de control óptimo de vehículos híbridos es la necesidad de conocer con total exactitud el ciclo de conducción para el que va a ser simulado y optimizado el control del vehículo. Por ello en un principio este método de optimización convexa ha sido utilizado para la optimización de autobuses de transporte urbano para los cuales es más sencilla la definición del ciclo de conducción, ya que siguen rutas prefijadas con anterioridad.

Cuando se intenta trasladar el mismo problema a un vehículo de uso particular la definición del ciclo de conducción es mucho más complicada. Un ciclo de conducción para optimización debe representar todas las diferentes condiciones de conducción que el vehículo pueda tener que hacer frente a lo largo de su vida útil. Sin embargo no es posible representar en un ciclo de conducción toda la vida de un vehículo, ya que el ciclo de conducción sería extremadamente largo e imposible de manejar (tiempos de simulación demasiado largos) por el algoritmo de simulación. La dificultad reside en realizar un ciclo de conducción mucho más corto que represente con suficiente precisión todas las posibles situaciones de conducción que puedan afectar al diseño óptimo del vehículo. Debido a la dificultad para generar y validar dicho ciclo de conducción durante el desarrollo del proyecto se decidió la utilización de un método alternativo.

El método en cuestión consiste en calcular el consumo de combustible y consumo energético del vehículo en modo de mantenimiento de carga (solo utilizando combustible) y modo puramente eléctrico respectivamente. Debido que de cada viaje conocemos la velocidad media del mismo, ambos consumo son correlacionados con la velocidad media del viaje. Un ejemplo de las correlaciones realizadas entre velocidad media y consumo de combustible y energético es mostrado en las Figuras Figura 14 y Figura 15.

Como ya ha sido mencionado el vehículo es controlado en un modo eléctrico/modo mantenimiento de carga. Si la batería está cargada el vehículo circula en un modo totalmente eléctrico. Una vez la batería se descarga el RE entra en funcionamiento manteniendo el nivel de carga dentro de un margen permitido. Los consumos en ambos modos de funcionamiento son calculados con el método de optimización convexa descrito anteriormente. El tren de potencia (tamaño de batería y tamaño del RE) se define previamente a la simulación mediante el método de optimización convexa. En el caso del modo puramente eléctrico se trata únicamente de una simulación del modelo, ya que no existe ninguna variable que optimizar. En el caso del modo de mantenimiento de carga el método de optimización decide en cada momento cual es la utilización de cada componente (RE y batería) teniendo como restricción que el SoC debe ser el mismo al empezar y finalizar el ciclo de conducción.

Así cada a cada viaje dentro de la base de datos se le asigna un consumo de combustible, un consumo eléctrico o ambos según el estado de carga de la batería y el modo de operación del vehículo. El consumo de los viajes se asigna siguiendo el orden cronológico en el que fueron realizados. Se comienza el primer viaje con la batería totalmente cargada y se van descontando

los consumos de electricidad de los viajes realizados. Cuando la batería llega a su nivel mínimo de carga el consumo pasa a ser un consumo de combustible. Todos los viajes hasta que se vuelva a cargar la batería son realizados con combustible. Al final de cada día la batería es cargada completamente de nuevo.

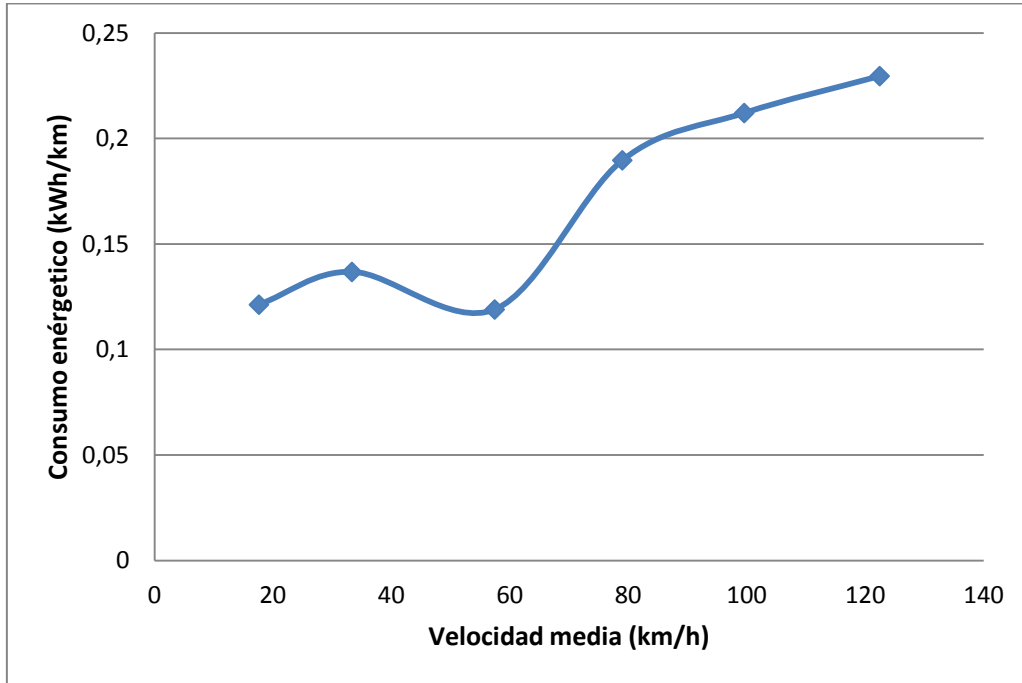


Figura 14. Correlacion velocidad media- consumo de combustible

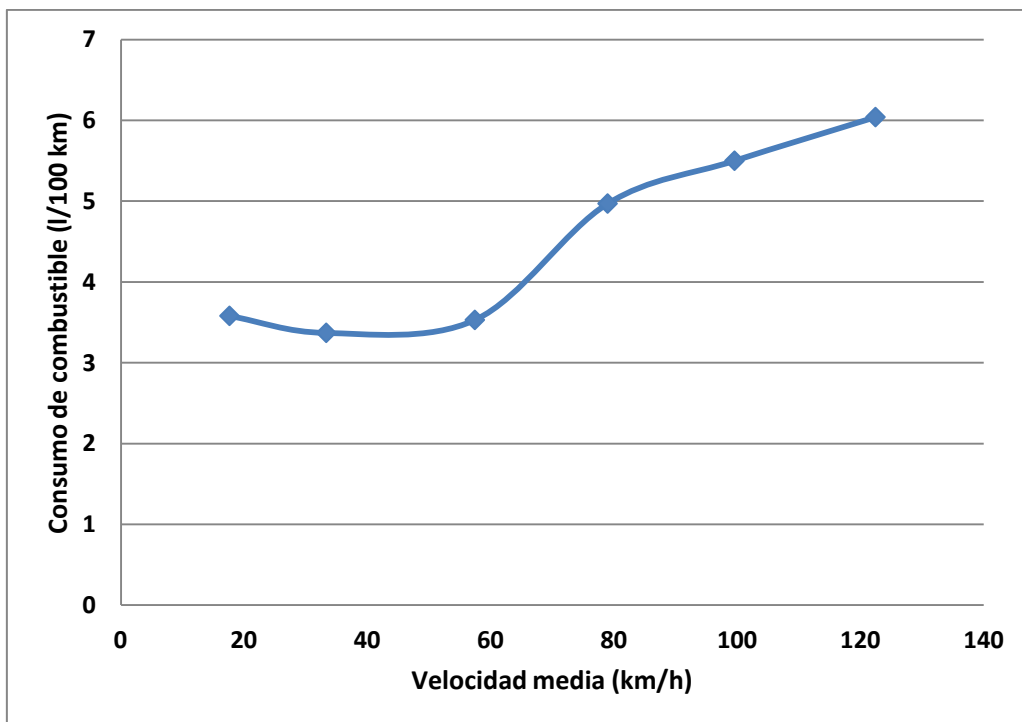


Figura 15. Correlación velocidad media - consumo energético

El proceso es repetido para distintos tamaños de batería, simulando y asignando nuevos valores de consumos para los distintos viajes. Una vez que se disponen de los consumos de combustible y electricidad para todos los distintos viajes y tamaños de batería estos pueden ser fácilmente traducidos a términos económicos utilizando el precio del combustible (€/l) y el precio de la electricidad (€/kWh) como será explicado en el apartado 5 y de esta manera realizar una optimización de costes. También es fácilmente calculable la cantidad de kilómetros conducidos con una y otra fuente de energía como se mostrará en el apartado 4.3.2.

En la Tabla 2 se muestran los principales datos necesarios para la simulación:

Vehicle Data	Mini	Volvo C30
Vehicle mass including battery [kg]	1300	1700
Frontal area [m ²]	2	2
Aerodynamic drag coefficient	0.3	0.33
Rolling resistance coefficient	0.01	0.01
Wheel radius [m]	0.308	0.318
Transmission		
Gear ratio motor to wheel	5.73	10.2
Other		
Power used by auxiliary devices [kW] Value in parenthesis is with range extender on and includes additional cooling pumps and inverter.	0.8	0.35 (0.40)

Tabla 2. Datos de ambos vehículo simulados.

Los mapas de eficiencia del Extensor de Rango, motor eléctrico y batería han sido modelados de la manera explicada en el artículo [9]. Por razones de confidencialidad estos mapas de eficiencia y los datos con los fueron contruidos no pueden ser mostrados dentro de este estudio.

4. Diseño del tren de potencia de un vehículo eléctrico de rango extendido

En las siguientes secciones (4.1, 4.2 y 4.3) se va a analizar cuáles son los principales factores que afectan en el diseño y dimensionamiento tanto del extensor de rango como de la batería en un REV.

4.1. Requerimientos de potencia por parte del motor eléctrico.

En el apartado 1 se ha explicado cual es el esquema del tren de potencia tanto de un vehículo híbrido serie como de un REV sin detallar cuáles son las potencias que deben tener los distintos componentes (motor eléctrico, extensor de autonomía y batería).

Las características del motor eléctrico (Curvas de par y potencia) deben ser seleccionadas dependiendo de las prestaciones (aceleración, velocidad máxima, máxima pendiente) deseadas para nuestro vehículo. En este estudio el motor eléctrico se ha considerado determinado antes de comenzar el dimensionamiento del resto de componentes. Conocida la potencia eléctrica demandada por el motor eléctrico, esta puede ser suministrada por la batería, por el RE o por cualquier combinación de las dos fuentes de potencia. Para poder utilizar la máxima capacidad del motor eléctrico la suma de potencia que el RE y la batería pueden suministrar debe ser igual o mayor a la máxima potencia demanda por el motor eléctrico:

$$\frac{P_{EM}}{\eta} \leq P_{RE} + P_{Bat}$$

Donde:

P_{EM} = Potencia motor eléctrico.

η = Rendimiento motor eléctrico.

P_{RE} = Potencia del Extensor de Rango.

P_{Bat} = Potencia de la batería.

Debe tenerse en cuenta que P_{EM} es no necesariamente la máxima potencia mecánica del motor eléctrico, sino la potencia en la que el cociente $\frac{P_{EM}}{\eta}$ es máximo.

En el caso de un REV existen otras dos restricciones que limitan el proceso de diseño del tren de potencia:

- En primer lugar, si el REV se diseña para tener un modo eléctrico en el que las máximas prestaciones están disponibles, la máxima potencia proveniente de la batería debe ser igual a la máxima posible potencia demandada por el motor eléctrico.

$$\frac{P_{em}}{\eta} \leq P_{bat}$$

Esta restricción asegura que la batería es capaz de proporcionar toda la potencia eléctrica que el motor eléctrico pueda demandar sin necesidad de hacer uso del RE.

- En segundo lugar, el tamaño del EGU no puede ser reducido por debajo de un cierto límite. Si se desea que en viajes largos, una vez descargada la batería, se sigan manteniendo las prestaciones del vehículo, el extensor de autonomía debe ser capaz de suministrar al menos la potencia media demandada por el motor eléctrico.

La Figura 16 representa los requerimientos de potencia por parte del motor eléctrico y los puntos más representativos dentro de todas las posibles combinaciones de extensor de autonomía y batería.

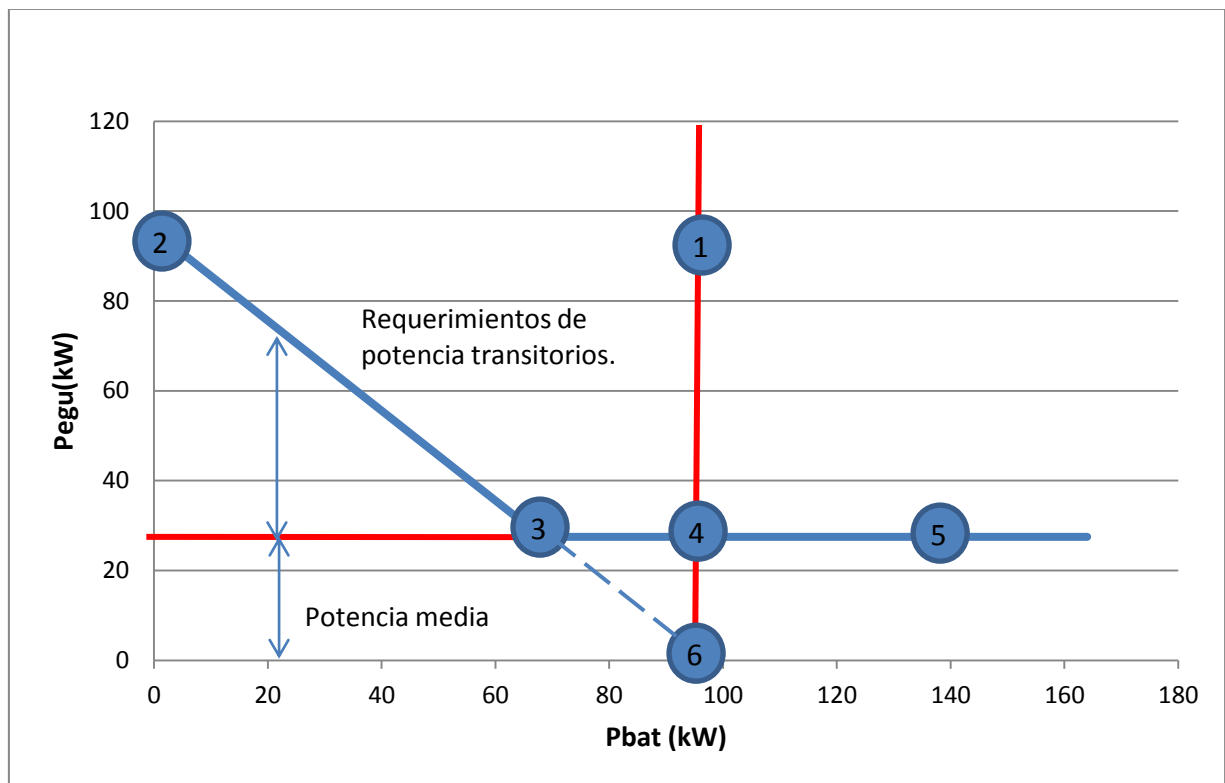


Figura 16. Requerimientos de potencia por parte del motor eléctrico.

A continuación se van a explicar los distintos puntos característicos que aparecen en la anterior figura:

1. Tanto la batería como el EGU son capaces de suministrar toda la potencia que el motor eléctrico pueda demandar.

Esta solución aunque posible desde un punto de vista técnico, carece de todo sentido desde un punto de vista ingenieril y económico. El vehículo será capaz de ofrecer máximas prestaciones con ambas fuentes de energía independientemente, pero haciendo un uso más inteligente de los recursos disponibles es posible disminuir el tamaño del motor/generador considerablemente.

Una solución más eficaz consiste en no descargar la batería completamente hasta su mínimo estado de carga (SoC), sino que se descarga dejando disponible todavía una cierta reserva de energía con la que poder hacer frente requerimientos de potencia transitorios que excedan la potencia de motor combustión/generador. De esta manera la batería actúa como un búfer absorbiendo los picos transitorios de potencia, mientras que el motor/generador es el encargado de proporcionar la energía (potencia media en el tiempo) demandada por el motor eléctrico.

El control más común para este tipo de vehículos es el denominado charge depleting-charge sustaining (CD-CS). Cuando la batería se encuentra totalmente cargada o el nivel de carga es suficiente el vehículo funciona de una manera puramente eléctrica utilizando únicamente la potencia proveniente de la batería, mientras que el motor de combustión permanece apagado. Cuando la batería se descarga hasta un estado de carga previamente definido el motor de combustión comienza a funcionar para mantener el SoC dentro una ventana de funcionamiento. En la siguiente Figura 17 se muestra la estrategia de control descrita anteriormente. Las distintas franjas de colores indican los distintos modos de funcionamiento.

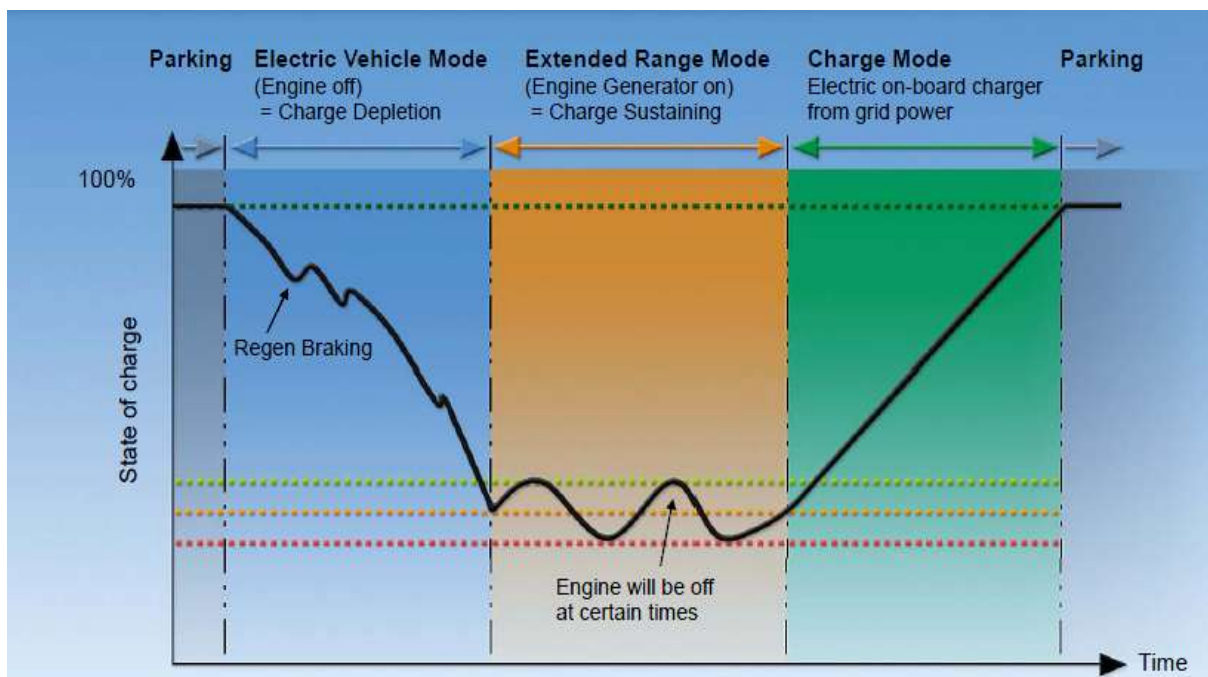


Figura 17. Estrategia de operación.

2. No batería.

Toda la potencia demanda es suministrada por el EGU alimentando directamente al motor eléctrico.

2-3. Combinaciones posibles de RE-batería.

3. Menor RE posible (sin restricción de prestaciones).

El motor combustión/generador esta dimensionado para cubrir únicamente las necesidades medias de potencia. Si se reduce la potencia del RE por debajo de ese nivel es posible que el vehículo no fuese totalmente capaz en largos recorridos. El coche no quedaría inoperativo y podría seguir siendo utilizado, pero el conductor experimentaría una limitación de las prestaciones. El valor de potencia del RE que asegura que el vehículo será capaz de mantener las prestaciones deseadas en viajes largos será discutido en la sección 4.2.

4. Vehículo eléctrico de rango extendido.

El vehículo cumple las dos restricciones adicionales planteadas anteriormente: Disponer de las máximas prestaciones en un modo puramente eléctrico y asegurar unas prestaciones esperadas en viajes más largos que el rango eléctrico del vehículo.

5. Battery sized by energy (electric range).

6. Vehículo puramente eléctrico.

No disponemos del extensor de rango. Una vez que la batería este totalmente descargada deberemos recargarla conectando a la red eléctrica. La autonomía es únicamente la proporcionada por la batería.

Sería posible no sobredimensionar el tren de potencia del vehículo en términos de potencia teniendo dos modos de conducción diferenciados. Un primer modo eléctrico puro, en el que el EGU permanecería siempre apagado, pero en el que el vehículo no ofrecería sus máximas prestaciones. En un segundo modo de funcionamiento, tanto la batería como el EGU entregarían potencia al motor eléctrico, con lo que se podrían alcanzar las máximas posibles prestaciones del vehículo. Esta solución nos permitiría optar por una batería menos potente, y por lo tanto más barata, pudiendo llegar a alcanzar los mismos niveles de prestaciones que



Figura 18. Modos de conducción.

También es cierto que esta solución tiene algunas desventajas que deberían ser estudiadas. La primera y más obvia es que no disponemos de las máximas prestaciones en un modo puramente eléctrico, lo que para el usuario podría dejar la sensación de que no dispone de un vehículo realmente eléctrico, ya que cada vez que este demandase las máximas prestaciones del vehículo el motor de combustión tendría que entrar en funcionamiento. La segunda desventaja o problema es la manera en que obtenemos las máximas prestaciones. ¿Debería ser el conductor el que eligiese entre los distintos modos disponibles o el control debería tomar esta decisión? Aspectos como las emisiones en los arranques, la velocidad con la que se es capaz de encender el motor de combustión o NVH deberían ser estudiados antes de optar por esta configuración.

Aunque la opción anteriormente presentada podría llevar a unos menores costes totales, en este estudio se ha considerado que el tren de potencia del vehículo es totalmente capaz utilizando solo la potencia proveniente de la batería (punto 4 en la Figura 16).

4.2. Dimensionamiento del motor combustión-generador.

Como ha sido explicado en 4.1, si la batería ha sido dimensionada para satisfacer las demandas transitorias de potencia, el motor combustión-generador solo tiene que ser dimensionado para suministrar la potencia media requerida.

En los siguientes apartados se va a estudiar cuales son los principales factores que influyen en los requerimientos medios de potencia y por lo tanto el tamaño del motor-generador. Cabe remarcar que las características del vehículo (coeficiente aerodinámico, área frontal, masa, coeficiente de rozamiento) así como el rendimiento de los distintos componentes de tren de potencia se consideran conocidos y por lo tanto no influyen en los requerimientos de potencia.

4.2.1. Efecto de la velocidad media.

El factor con mayor influencia en la demanda media de potencia de un vehículo es la velocidad del ciclo de conducción.

La Figura 19 representa la potencia del extensor autonomía necesaria para mantener una velocidad constante (línea roja) y la potencia necesaria para conducir ciclos de conducción reales (puntos azules). Para construir la figura se ha considerado que toda la energía necesaria para completar los ciclos de conducción tiene que provenir del extensor de rango. Aunque la batería puede ser utilizada para demandas de potencia transitorias, el nivel de carga al iniciar y finalizar el ciclo de conducción debe ser idéntico, por lo que toda la energía necesaria proviene del combustible.

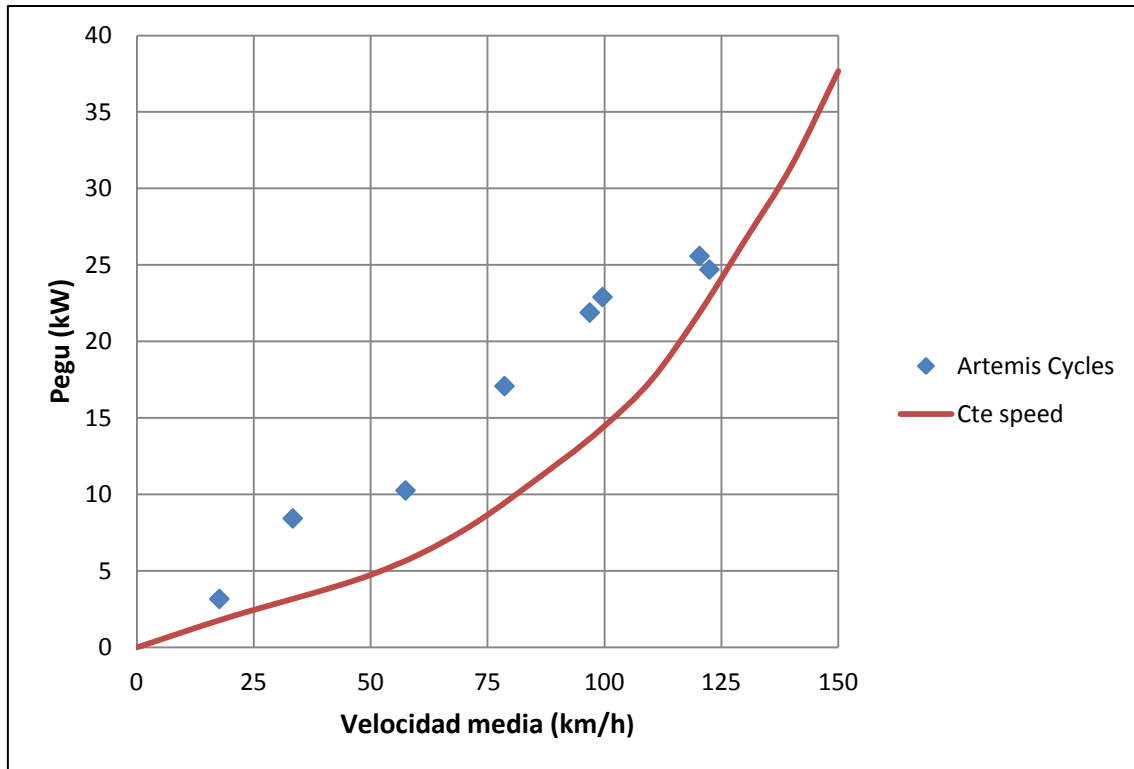


Figura 19. Potencia extensor autonomía

En la figura anterior se puede observar la mayor potencia demandada por los ciclos de conducción reales (puntos azules) que la potencia requerida para mantener la misma velocidad constante. Los ciclos reales presentan aceleraciones, periodos en los cuales la potencia demandada es mayor que la demandada para mantener la velocidad constante. Aunque los REVs pueden regenerar la energía perdida durante el frenado, lo que compensaría la energía extra aportada durante las aceleraciones, existen dos factores por los que no es posible recuperar toda la energía:

- El motor eléctrico actuando como generador presenta una eficiencia de generación menor que 1.
- Los ciclos de carga y descarga de la batería añaden unas pérdidas adicionales.

Es importante remarcar que los viajes con velocidades medias más altas presentan una demanda de potencia muy similar a la que requiere mantener la misma velocidad constante, ya que estos ciclos de conducción no presentan aceleraciones y deceleraciones importantes.

Para mantener una velocidad constante de 150km/h es necesario un RE de al menos 38 kW. Sin embargo con un RE de 25 kW sería posible completar el 99.85% de los viajes presentes en la base de datos utilizada. Este tamaño además sería suficiente para mantener una velocidad constante de 130 km/h.

4.2.2. Efecto de las pendientes

Las pendientes son otro factor que puede influenciar los requerimientos medios de potencia y por lo tanto la potencia necesaria EGU.

Mientras la batería no esté totalmente descargada los gradientes o pendientes no representan un problema, ya que la batería será capaz de suministrar toda la potencia demandada por el motor de tracción. Sin embargo si hemos llegado al punto en que la batería está totalmente descargada y la potencia media demandada sigue siendo superior a la máxima potencia que puede producir el extensor de rango se producirían limitaciones de potencia y por tanto de prestaciones importantes.

La potencia requerida para ascender una cierta pendiente es:

$$P_{climbing} = m \cdot g \cdot \sin(pendiente) \cdot v \cong m \cdot g \cdot slope \cdot v$$

Ascender una pendiente del 5% a 90 km/h requiere 18.38 kW (23 kW con un rendimiento medio del 80%) adicionales a los necesarios para mantener una velocidad constante. Para mantener 90 km/h con un 5% de desnivel se necesitaría un RE de unos 35 Kw.

Esta demanda adicional de potencia no representa un problema si se trata de una pendiente puntual, pero si la pendiente se extiende en el tiempo esta potencia extra deberá ser suministrada por el extensor de rango o disponer de una reserva suficiente de energía en la batería. Por ello es importante conocer la energía requerida para ascender un determinado desnivel. Esto nos dará una noción aproximada de cuál es la energía extra necesaria que deberemos tener en la batería para hacer frente con garantías el desnivel en cuestión.

$$E_{climbing} = P_{climbing} \cdot t = m \cdot g \cdot slope \cdot v \cdot t$$

$$E_{climbing} = m \cdot g \cdot h$$

La energía adicional para ascender 1000 metros es 4.1 kWh (5 kWh si se considera un rendimiento medio del 80%). Por lo tanto si disponemos de esa energía extra en la batería ascender un desnivel de 1000 metros no representará un problema, aun cuando el RE este dimensionado únicamente para mantener la velocidad en carreteras sin desnivel.

4.2.3. Otros efectos

Aunque en el apartado 4.2.1 se han considerado la influencia de las aceleraciones en la demanda de potencia, ya que los ciclos de conducción Artemis presentan dinámicas realistas, el estilo de conducción de cada conductor puede afectar a las demandas de energía. Incluso manteniendo la misma velocidad media distintos conductores presentan distintas conductas y agresividad a la hora de conducir. Esto puede afectar a la eficiencia de tren de potencia, especialmente a la cantidad de energía que el vehículo es capaz de regenerar durante las deceleraciones.

Otros aspectos como el uso de auxiliares (calefacción, climatización, iluminación) tienen también una influencia en la demanda media de potencia. Las simulaciones han sido realizadas considerando una demanda de potencia media por parte de los sistemas auxiliares de 1000W. Este valor podría variar dependiendo del uso que el usuario haga del sistema de climatización así como de las condiciones ambientales modificando ligeramente la potencia media demandada.

El estudio exhaustivo de la influencia de estos factores queda fuera del alcance de este proyecto, y deberá ser analizado en mayor detalle en sucesivas investigaciones.

4.2.4. Estrategias de operación inteligentes.

Una estrategia de operación inteligente del tren de potencia puede permitir utilizar un conjunto motor de combustión/generador más pequeño sin comprometer las prestaciones en los recorridos más largos o en condiciones exigentes como puertos de montaña. Estas estrategias de operación inteligentes se basan en el conocimiento de las condiciones futuras de conducción y en la anticipación por parte del sistema de control.

Si el sistema de control prevé una futura necesidad de energía extra, el vehículo deja de operar en modo totalmente eléctrico (aunque en ese momento hubiese carga suficiente en la batería) y el extensor de rango entra en funcionamiento con intención de mantener o incluso incrementar el nivel de carga actual y disponer de una reserva de energía suficiente con la que hacer frente sin dificultades a las condiciones de conducción futuras.

Dependiendo del grado de implicación del conductor en la toma de decisión:

- El conductor debe activar un 'modo montaña'. En este modo el extensor de autonomía produciría más potencia de la necesaria desde el inicio del viaje intentando cargar o al menos mantener el nivel de carga de la batería. Cuando se llegase a la zona con una alta demanda de energía, por ejemplo un puerto de montaña, tendríamos suficiente energía almacenada en la batería para suministrar durante un periodo de tiempo prolongado el exceso de potencia que no puede ser dado por el extensor de autonomía. La desventaja de esta opción reside en que la decisión de cambiar el modo de conducción reside en el propio conductor, el cual no tiene por qué conocer el perfil de terreno o simplemente no tomar la decisión adecuada.
- La segunda opción es predefinir la ruta haciendo uso de GPS. Antes de comenzar el viaje el usuario debería introducir el destino deseado. Con ello el GPS calcularía la ruta más conveniente y basándose en el perfil de la ruta, límites de velocidad y otros posibles factores como el estilo de conducción del usuario o el uso de los auxiliares (calefacción, sistemas de entretenimiento,..etc.) el sistema sería capaz de estimar la energía necesaria para recorrer la ruta y ajustar la producción de energía por parte del extensor de rango a la demanda energética del recorrido. Sería la opción con la que se podrían controlar las necesidades energéticas de una manera más eficiente para mantener en todo momento las prestaciones esperadas por parte del usuario. La única

desventaja se encuentra en que es necesario que el usuario introduzca el destino para que el sistema funcione.

- Una estrategia más sofisticada, pero transparente para el conductor, sería intentar predecir la ruta que el conductor va a tomar. De una forma similar a la forma en que un ordenador elige la mejor jugada en una partida de ajedrez, todas las posibles rutas están siendo permanentemente chequeadas calculando la posibilidad de tomar una ruta con una demanda de energía superior a las reservas actuales. Si el sistema determina que es probable que en un futuro cercano se necesite una energía extra se mandará la orden al extensor de rango para anticiparse y crear la reserva de energía con la que poder cubrir las futuras demandas de potencia.

4.2.5. Tamaño a seleccionar

La elección del tamaño necesario o deseable para el extensor de rango debe ser hecha teniendo en cuenta dos factores principales: prestaciones y coste. El tamaño elegido para el RE debe asegurar en todo momento el nivel de prestaciones esperado o al menos el mínimo aceptado por el consumidor. La elección de un RE demasiado ajustado en términos de potencia puede dar lugar a situaciones en las que el vehículo presente limitaciones importantes que pueden crear una gran insatisfacción en el usuario. Por otra parte es importante reducir el coste en la medida de lo posible, utilizando componentes más pequeños y por lo tanto más baratos.

Desde un punto de vista del fabricante es posible que la mejor solución sea optar por un extensor de rango ligeramente sobredimensionado, que sea capaz de hacer frente en todo momento a las posibles demandas medias de potencia. Clientes descontentos con el rendimiento de su vehículo y la mala publicidad por parte de medios especializados al descubrir limitaciones en las prestaciones podrían provocar, más aun en una tecnología nueva y poco conocida, un rechazo inicial de los REV por parte de los consumidores. La recomendación dada por este estudio es optar inicialmente por un RE de una potencia aproximada de 35-38 Kw para el vehículo de uso general. Para el vehículo urbano es posible que un RE de 25 Kw fuese suficiente, ya que raramente será usado en zonas montañosas y los requerimientos que los usuarios hacen sobre estos vehículos son habitualmente menores. A medida que este tipo de vehículos sean introducidos en el mercado y los fabricantes puedan entender de una forma más precisa el uso que los usuarios dan a sus vehículos, será posible ajustar el tamaño del RE al uso real que los usuarios hacen de ellos.

4.3. Dimensionamiento de la batería

En este apartado se van a discutir cuales son los principales mecanismos que afectan en el dimensionamiento de la batería. La optimización de costes mediante la cual se encuentra el tamaño óptimo de la batería será explicada en la sección 1 y los resultados derivados de esta serán mostrados y discutidos en la sección 1.

4.3.1. Porcentaje de kilómetros conducidos eléctricamente.

La principal razón para la frecuentemente llamada electrificación del automóvil es la reducción de las emisiones globales y locales, así como reducir la dependencia energética del petróleo. Aunque los REVs no cortan el 100 % de las emisiones locales, ya que todavía se necesita combustible para realizar viajes más largos que el rango eléctrico del vehículo, son una solución interesante para reducir la cantidad de combustible utilizado. La cantidad de kilómetros conducidos de manera eléctrica también determina la economía del tren de potencia. Con los precios de la energía eléctrica y de los combustibles fósiles actuales el kilómetro eléctrico es significativamente más barato que el kilómetro conducido con combustible y por lo tanto al aumentar la fracción de kilómetros eléctricos se reduce el coste de operación (€/km) del vehículo.

En la Figura 20 se muestra el porcentaje de kilómetros totales que pueden ser conducidos eléctricamente en función del tamaño de la batería.

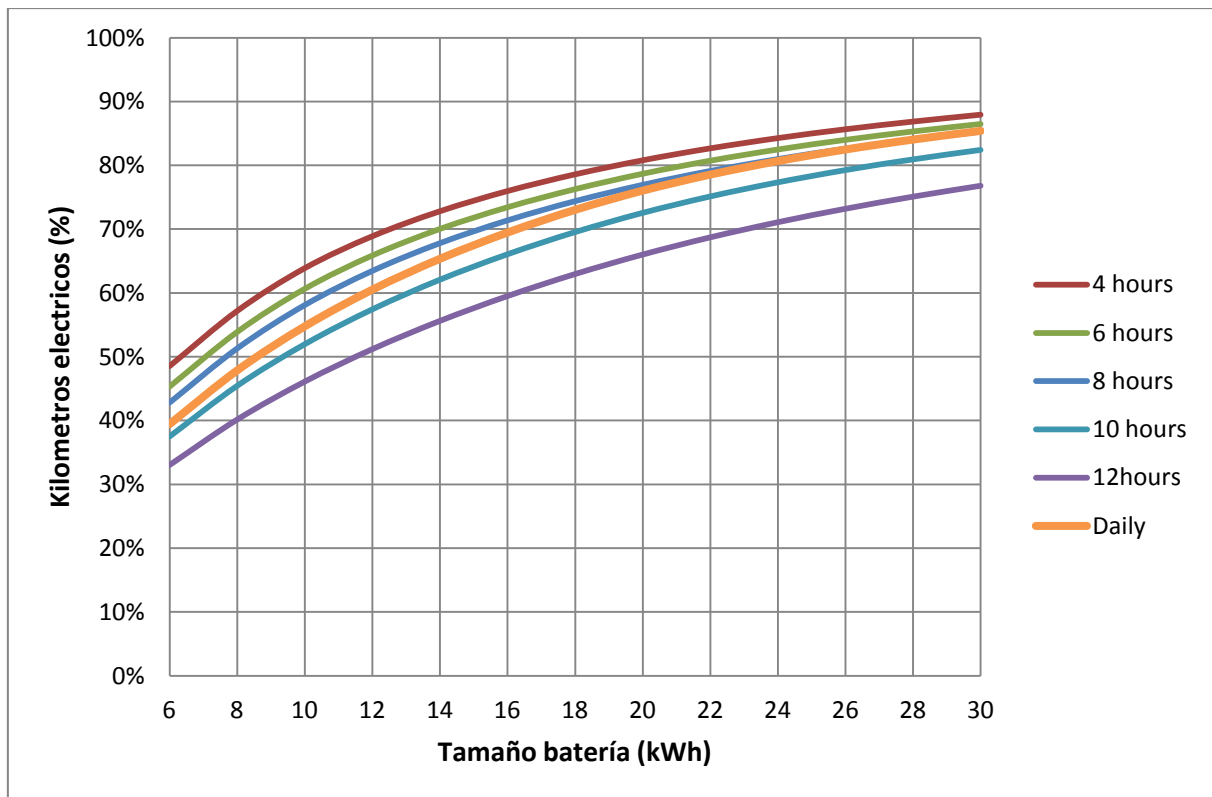


Figura 20. Porcentaje de kilómetros eléctricos.

Para realizar la anterior Figura 20 se ha considerado como escenario base que el vehículo es recargado cada noche (línea naranja). Además se han añadido otros casos suponiendo que permitimos recargar el vehículo cada vez que el tiempo de parada es mayor de 4, 6, 8,10 y 12 horas respectivamente.

Si estudiamos la figura se puede observar que incluso tamaños de baterías pequeños, y por lo tanto rangos eléctricos reducidos, pueden reemplazar una cantidad considerable de kilómetros conducidos con combustible por kilómetros conducidos eléctricamente. Cargando el vehículo únicamente durante la noche, el 70% de kilómetros totales pueden ser conducidos eléctricamente con una batería de 16 kWh y el 50% de kilómetros con una batería tan pequeña como 9kWh.

La razón que explica porque los REV pueden ser una solución interesante es la necesidad de optar por baterías cada vez más grandes si queremos un rango eléctrico mayor. Esto significa que tanto el coste como el peso de batería aumentan considerablemente aun cuando raramente será utilizado el rango eléctrico completo de la batería. En la Figura 20 se puede observar como la pendiente de las curvas disminuye al aumentar el tamaño del paquete de baterías. La tendencia de la curva muestra que si quisiéramos conducir el 100% de kilómetros eléctricamente sería necesario disponer de una batería extremadamente grande, lo que conllevaría a un coste inicial de vehículo difícilmente amortizable con el futuro ahorro en combustible. Mientras que los primeros kWh reducen considerablemente la cantidad de kilómetros conducidos con combustible, a medida que aumentamos en tamaño de la batería esta es menos efectiva en su tarea de reducir el uso de combustible. En la Figura 21 se muestra la derivada de la Figura 20, la cual muestra cual es el incremento de kilómetros eléctricos conducidos por kWh adicional de batería.

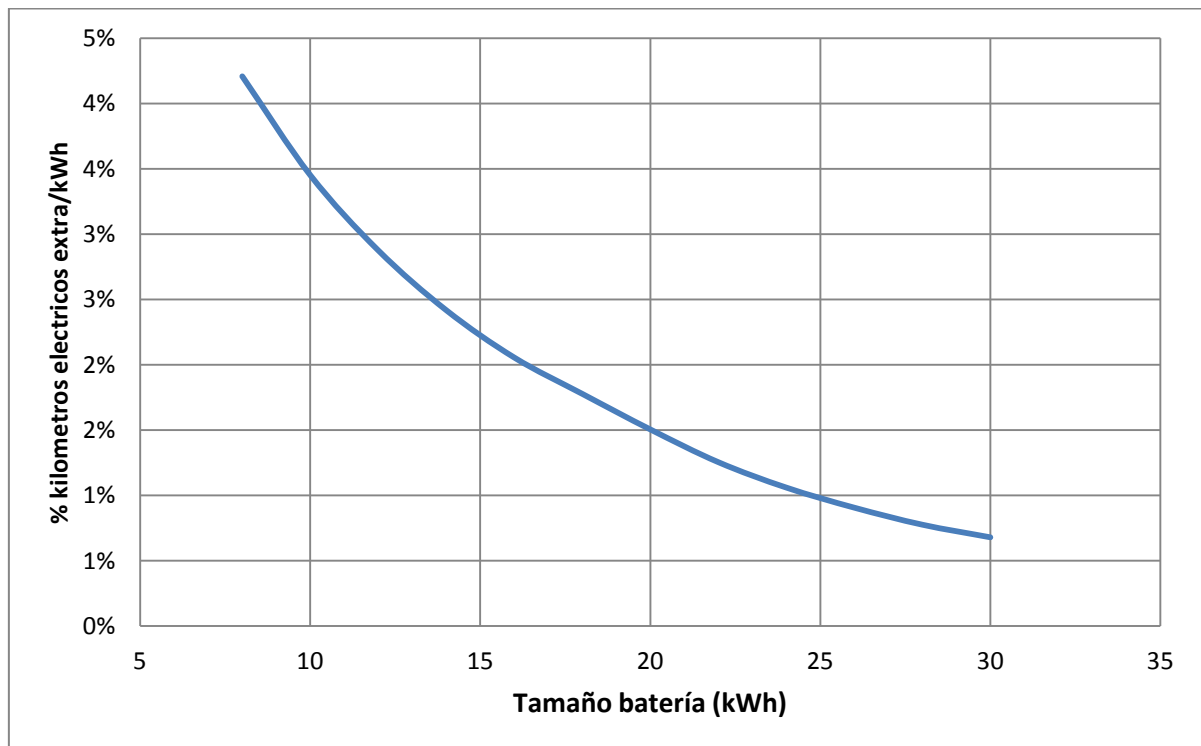


Figura 21. Aumento del % de kilómetros eléctricos por kWh adicional.

Se puede observar como la curva desciende al aumentar el tamaño de la batería, indicando que cada kWh adicional es menos eficaz a la hora de reducir el número de kilómetros conducidos con combustible. Se podría decir que los primeros kWh de batería son más rentables, ya que la inversión hecha en ellos se recuperará fácilmente debido al menor coste del kilometro eléctrico. Sin embargo a medida que aumenta el tamaño de la batería los kWh adicionales ayudan cada vez menos a aumentar el porcentaje de kilómetros conducidos eléctricamente, y por lo tanto será más difícil amortizar el aumento de coste inicial causado por una batería mayor.

Valores similares han que los mostrados en la Figura 20 se pueden encontrar en [11]. Volts Stats recoge información acerca del rendimiento y uso por parte de más de 1000 propietarios del Chevrolet Volt que voluntariamente ceden los datos de sus vehículos con esta página web. Con un paquete de baterías de 16 kWh los conductores registrados en esta web de presentan más de un 75 % del total de kilómetros conducidos exclusivamente con energía eléctrica proveniente de la batería.

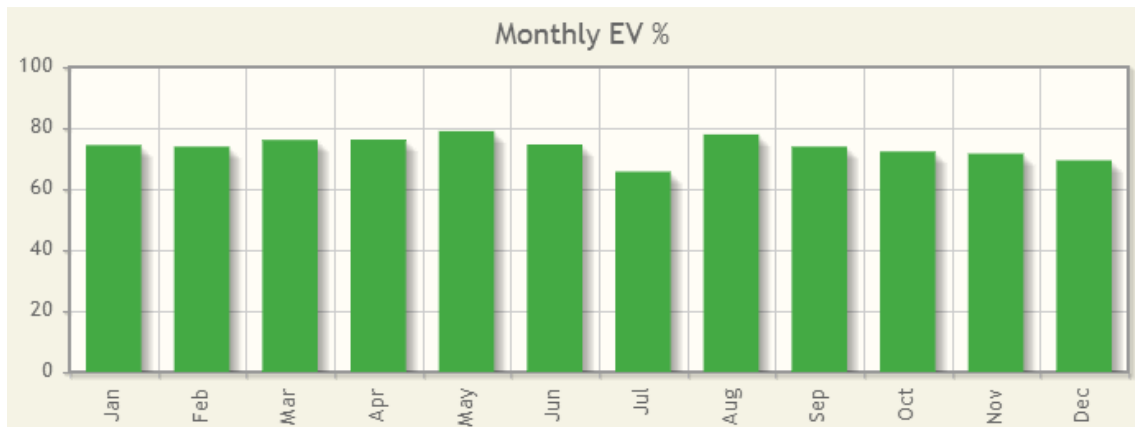


Figura 22. % kilómetros eléctricos Volts Stats.

En la página oficial del vehículo [12] también se puede encontrar unos interesantes contadores en los que se muestra en tiempo real la cantidad total de kilómetros recorridos por los propietarios del vehículo y cuántos de estos han sido conducidos eléctricamente. Todos los vehículos vendidos están equipados con el sistema OnStar que registra datos del vehículo en tiempo real así como diferentes servicios para el conductor. Aproximadamente 2/3 partes del total de kilómetros recorridos por los usuarios del vehículo han sido utilizando la energía eléctrica proveniente de la red.



Figura 23. Distancia eléctrica/ distancia total de todos los Chevrolet Volt vendidos.

La diferencia entre ambas fuentes se puede deber a que los usuarios que registran sus vehículos en el recurso Volts Stats son probablemente usuarios orgullosos del uso que hacen de su vehículo y que quieren mostrarlo y compartirlo con otros conductores, mientras que en la página oficial del vehículo están registrados sin excepción todos los kilómetros realizados con el modelo hasta la fecha.

Como se mostrará en el apartado 6.4 y más concretamente en la Figura 29 la cantidad de kilómetros eléctricos es fuertemente dependiente del uso que cada usuario hace de su vehículo y por lo tanto del tipo de conductores en el que fijemos la atención. Sin embargo es importante destacar que en términos globales los resultados proporcionados por otros medios son muy similares al 70 % de kilómetros totales que de acuerdo con lo mostrado en la Figura 20 una batería de 16 kWh podría realizar eléctricamente.

4.3.2. Ratio Potencia-Energía

Como ya ha sido mencionado en varias ocasiones, si el objetivo es disponer de un modo eléctrico completamente capaz en término de prestaciones, la batería debe ser capaz de alimentar al motor eléctrico con toda la potencia eléctrica que este pueda demandar. De esta manera la máxima potencia disponible por parte de la batería queda automáticamente definida una vez que la potencia y rendimiento del motor eléctrico son conocidos.

Diferentes vehículos híbridos requieren diferentes ratios de descarga por parte de la batería. En general las baterías se pueden calificar como baterías optimizadas en términos de energía o en términos de potencia. Los denominados HEV usan baterías optimizadas para dar potencia, ya que al no poder recargar la batería desde una fuente externa la función principal de la batería es proporcionar potencia al motor eléctrico y no almacenar energía. En el caso de los PHEV y BEV en los que es posible recargar la batería conectando a la red de suministro, la batería tiene también una función de depósito de energía y por lo tanto tiende a ser de mayor tamaño. Esto hace que sea posible optar por baterías más pobres en términos de potencia, ya que la potencia total demandada será conseguida debido al mayor tamaño de esta (mayor número de celdas totales).

En la Figura 24 se muestra como el coste específico (\$/kWh) de la batería es fuertemente dependiente del ratio potencia/ energía (W/Wh) de la batería. A medida que el ratio potencia/energía aumenta el coste de la batería por kWh aumenta en consonancia.

Las baterías optimizadas para suministrar potencia, aunque más caras por kWh, resultan mucho más baratas por kW. Con las baterías optimizadas en términos de energía sucede lo contrario. El coste por kWh es menor, mientras que se necesita una batería mayor y por lo tanto más cara para conseguir la misma potencia de la batería.

En el siguiente apartado 4.3.3 se ha modelado el coste específico de la batería (€/kWh) como función de propio tamaño de esta utilizando la Figura 24.

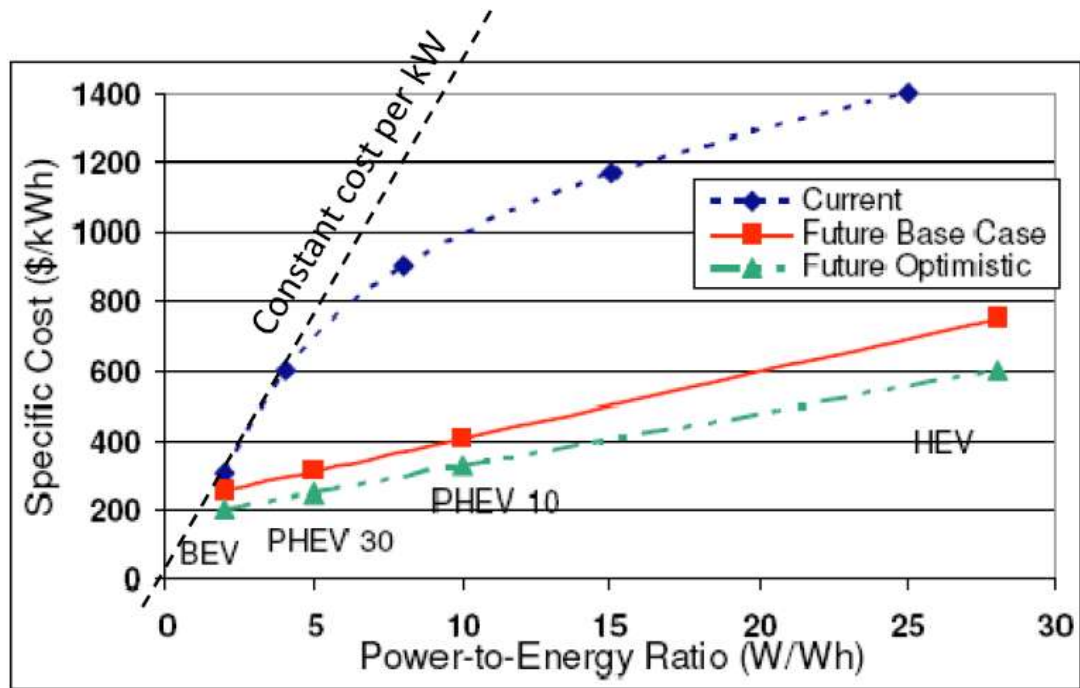


Figura 24. Coste específico en función del ratio potencia-energía.

4.3.3. Precio de la batería

El factor más determinante para la futura introducción de los vehículos eléctricos y de los vehículos híbridos enchufables es sin duda el precio de las baterías. Existen muchas y variadas previsiones de cuál será el precio de las baterías en un futuro próximo, siendo en la mayoría de ocasiones 2020 el año de referencia. Los precios estimados por kWh varían desde los muy optimistas que pronostican valores de 160\$/kWh hasta los 450\$/kWh en 2020 [13][14]. Incluso los precios actuales son difíciles de pronosticar, pero según varias fuentes podrían rondar los 600-800\$/kWh [15].

Ya que el objetivo de este estudio no es el de pronosticar el precio que podrán alcanzar en un futuro las baterías, se ha preferido tomar 3 niveles de precios y estudiar qué influencia tiene esa variación en el precio de las baterías en el óptimo que encontramos.

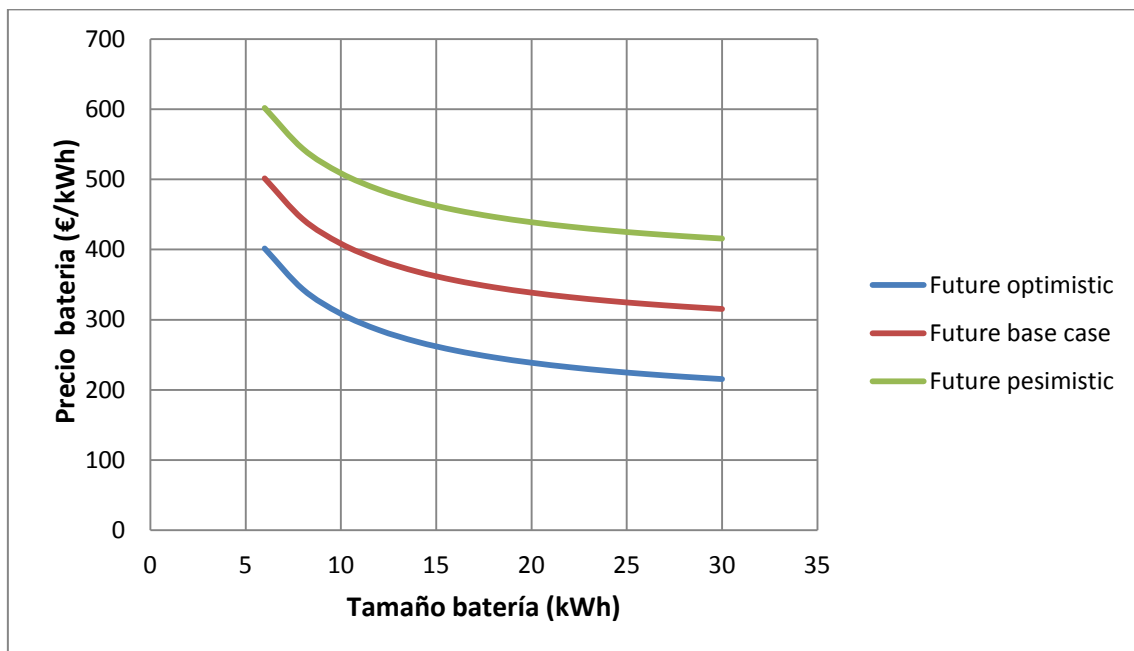


Figura 25. Precio de la batería

En la Figura 25 se puede observar que en este modelo de precios se ha introducido el fenómeno descrito en la sección anterior: el precio por kWh aumenta al disminuir el tamaño de la batería (kWh), ya que si la potencia a suministrar es la misma se hace necesario optar por baterías más potentes y por consecuencia más caras.

5. Optimización de costes

La optimización de costes tiene como objetivo encontrar cual es el tamaño de batería que minimiza el coste total de propiedad del vehículo. Este coste total lo podemos dividir en dos costes secundarios:

Por un lado tenemos el **coste inicial** de vehículo. Al aumentar el tamaño de la batería el precio del vehículo aumenta en consonancia con esta. A la hora de buscar el óptimo no se ha incluido en el precio inicial el coste del resto del vehículo, ya que esto solo influiría el valor del coste total pero no el tamaño de óptimo de batería. De la misma manera no se ha considerado ninguna posible subvención a este tipo de vehículos, ya que aunque los haría más competitivos frente a otros vehículos no tiene influencia en el tamaño óptimo de batería.

Por otro lado está el **coste de operación** o coste por kilometro. Al aumentar el tamaño de la batería disminuye el coste de operación ya que aumenta el porcentaje de kilómetros conducidos haciendo uso de energía eléctrica, y con los precios actuales el kilometro eléctrico es considerablemente más barato que el kilometro conducido con combustible. El coste de operación depende de varios factores:

- Distancia total recorrida en el periodo de amortización.
- Precios de electricidad y combustible.
- Patrones de conducción: Determinan la fracción de kilómetros recorridos con ambas fuentes de energía y el consumo en cada modo de conducción.

La suma de ambos costes (coste inicial y coste de operación) determinan el coste total de propiedad del vehículo durante su vida útil:

$$\text{Coste Total} = \text{Coste Inicial} + \text{Coste Operación}$$

Los 3 distintos costes están representados en la Figura 26.

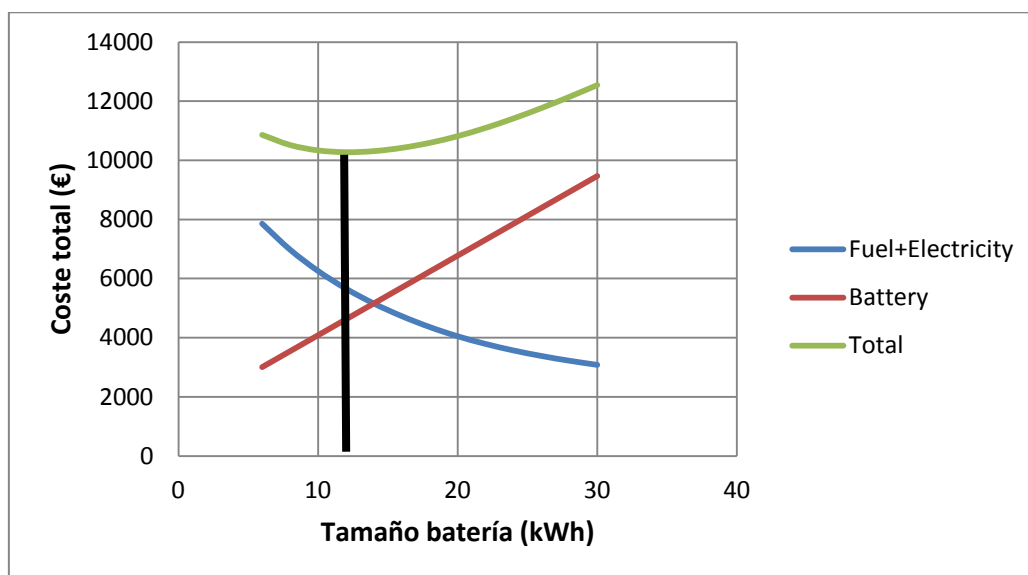


Figura 26. Coste total de propiedad.

El mínimo de la curva de coste total determina el tamaño óptimo de batería. Desde un punto de vista matemático este es el punto en el la pendiente de las curvas de coste inicial y coste de operación se iguala (con distinto signo) haciendo cero la pendiente de la curva del coste total.

$$\text{Min}(\text{Coste Total}) = \text{dif}(\text{Coste Inicial} + \text{Coste Operación}) = 0$$

En la siguiente tabla se muestran los principales parámetros utilizados durante la optimización de costes:

Precio combustible	1.7 €/l
Precio electricidad	0.12 €/kWh
Precio batería	Valores mostrados en la Figura 25
Kilómetros totales recorridos	150.000 km

Tabla 3. Valores utilizados en la optimización de costes.

6. Comparación del tamaño óptimo de batería para los 2 tipos de vehículos.

En esta sección se va a comparar el tamaño óptimo de batería para los dos vehículos estudiados en este proyecto: un vehículo de pasajeros de uso general y un vehículo orientado principalmente a entornos urbanos.

6.3 Definición de los nichos de mercado.

En primer lugar se van a definir los nichos de mercado para los que están enfocados ambos tipos de vehículos. El reto se encuentra en traducir los fácilmente entendibles nichos de mercado en patrones de conducción con los que poder realizar la optimización de costes.

6.3.4 Vehículo urbano

El Mini representa a un conductor cuyo uso del vehículo se centra mayoritariamente dentro de entornos urbanos o en los alrededores de la ciudad y que solo de forma esporádica utiliza el vehículo para recorrer largas distancias. Debido a que el vehículo es raramente usado para hacer largos viajes (quizás siendo el segundo coche de la familia), su conductor puede aceptar ciertas limitaciones en las prestaciones que este vehículo presenta en viajes largos, ya que el énfasis está en disponer de un vehículo ligero y económico para su uso por ciudad.

6.3.5 Vehículo de pasajeros para cualquier uso

El Volvo C30, aunque de un tamaño no mucho mayor al del Mini, quiere representar a un conductor que usa más frecuentemente el vehículo para realizar viajes largos (probablemente es el primer o único coche de la familia) y por lo tanto no se espera ningún tipo de limitación en cuanto a prestaciones en viajes de mayor distancia.

La razón por la que se eligió un Volvo C30 para representar un vehículo para cualquier uso o familiar fue una razón puramente técnica, ya que era más sencillo y económico realizar el prototipo al existir ya una versión eléctrica de este modelo.

6.3.6 Patrones de conducción para los dos tipos de vehículos

Para definir con exactitud los parámetros de conducción que determinan a ambos tipos de vehículos sería necesario estudiar vehículos y conductores representativos de cada nicho de mercado. Al no disponer de información específica acerca del tipo de vehículo o acerca la localización de los vehículos presentes en la base de datos se ha decidido dividir la base de datos en dos: el 50% de conductores que conducen viajes más largos y el 50% que conducen viajes más cortos. Es decir se ha dividido la base de datos por el percentil 50 dando lugar a dos nuevas distribuciones, las cuales pretenden representar el uso de ambos vehículos.

Comparación del tamaño optimo de batería para los 2 tipos de vehículos.

La línea azul pretende representar al vehículo urbano, el cual recorre distancias más cortas, mientras que la línea roja se podría asemejar a un vehículo concebido para un uso más amplio, el cual recorre en general distancias mas largas. Aunque es posible que estas dos distribuciones no representen perfectamente ambos nichos de mercado, si que muestran las principales tendencias que podrían ser esperadas de ambos tipos de vehículos.

En las Figuras Figura 27 y Figura 28 se muestra la distancia diaria recorrida y la distribución de velocidades para ambos vehículos.

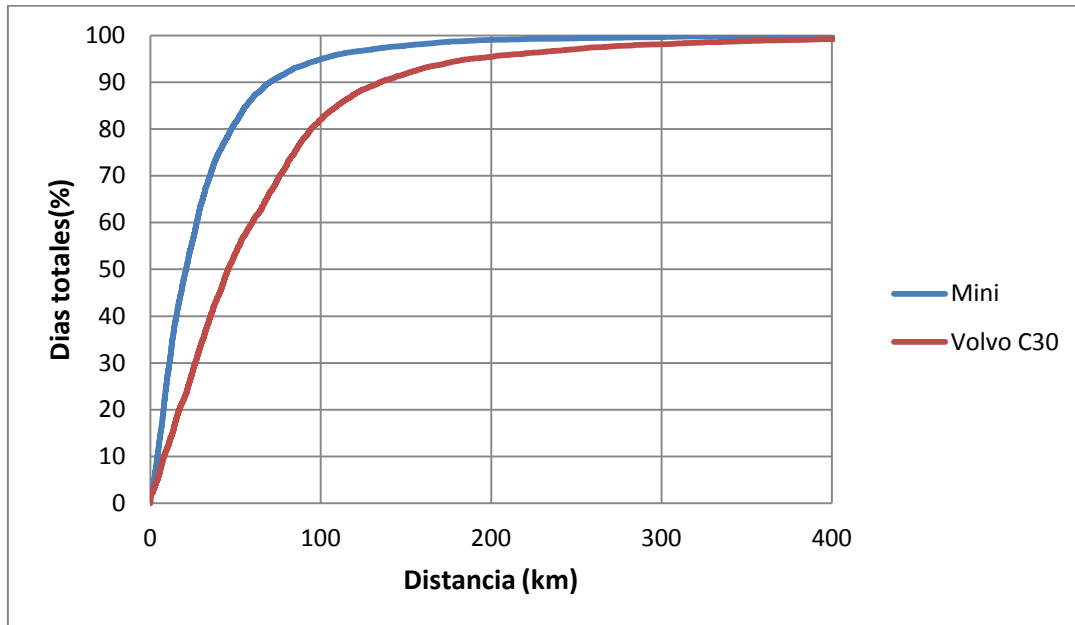


Figura 27. Distribución distancia recorrida diariamente para ambos vehículos.

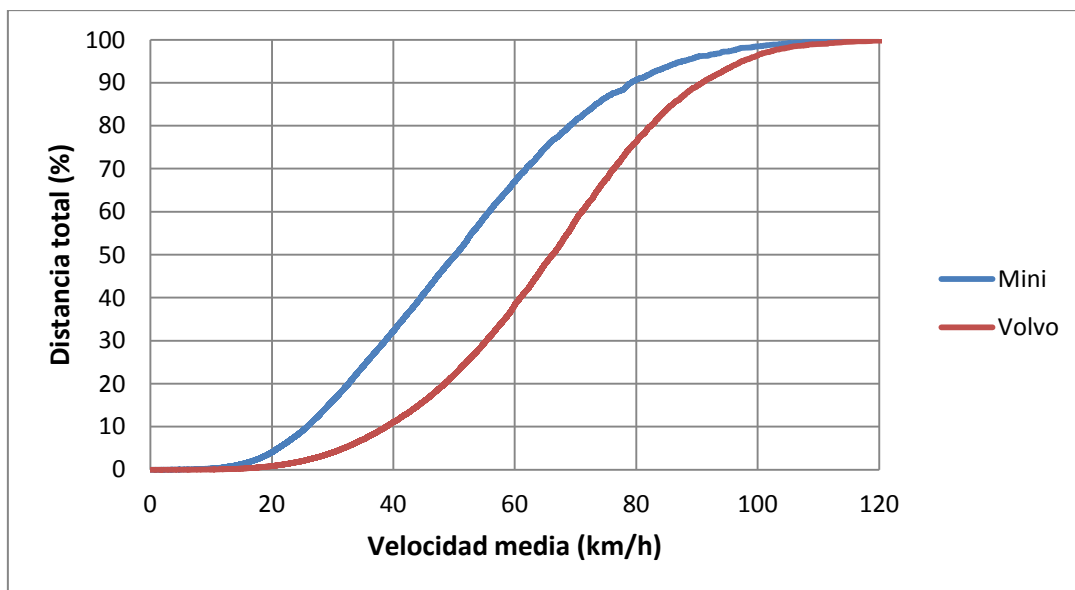


Figura 28. Distribución de velocidades para ambos vehículos.

La Figura 27 muestra como el vehículo urbano recorre distancias diarias considerablemente mas cortas que el vehículo de uso general. En el caso del vehículo urbano el 80% de los días recorre distancias menores a 50 km comparado con los casi 100 km para el vehículo familiar. Así mismo en la Figura 28 se puede observar que los vehículos que recorren distancias mas cortas también conducen en general más despacio. Esta es la tendencia esperada, ya que la gran mayoría de viajes realizados por el vehículo urbano serán dentro de la ciudad y por lo tanto la velocidad media de este vehículo será por lo general mas lenta.

6.4 Comparación de ambos vehículos

En primer lugar podemos comparar el porcentaje de kilómetros totales que podrían ser remplazados por ambos vehículos dependiendo del tamaño de la batería (Figura 29).

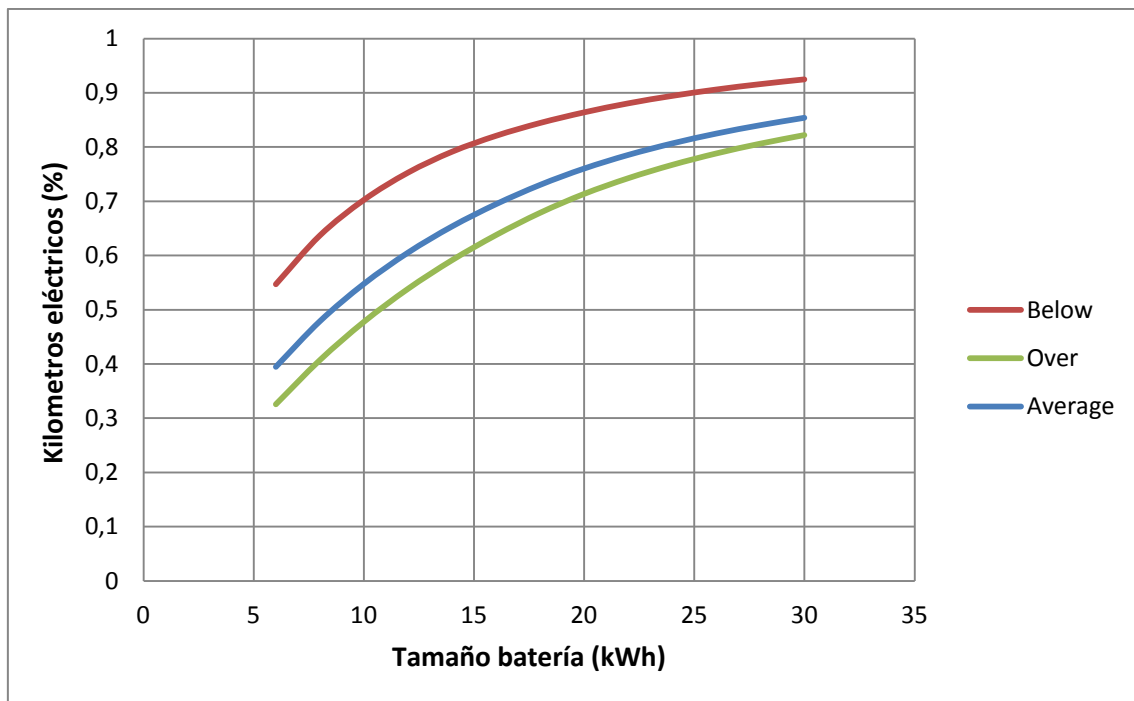


Figura 29. Porcentaje kilómetros eléctricos para ambos vehículos.

En la anterior Figura 29 se puede observar que el 50 % de vehículos que conducen viajes mas cortos son capaces de recorrer el 70 % de kilómetros con energía eléctrica con una batería de tan solo 10 kWh y hasta el 80 % si aumentamos la capacidad de esta hasta unos razonables 15 kWh. Esto refuerza todavía más la idea de que para una gran cantidad de conductores tamaños de batería (rangos eléctricos) que podrían considerarse reducidos son capaces de reducir de una manera muy notable el uso de combustibles fósiles. En el caso del vehículo de uso general (50% conductores que conducen viajes más largos) se debe aumentar el tamaño de la batería hasta unos considerables 20 kWh para remplazar el 70 % de kilómetros conducidos con combustible, lo que significa doblar el tamaño de la batería con respecto al vehículo urbano.

Comparación del tamaño optimo de batería para los 2 tipos de vehículos.

En las FigurasFigura 30 yFigura 31 se muestra el coste total de propiedad para el vehículo urbano y el vehículo de uso general respectivamente para 3 posibles escenarios en el coste de la batería.

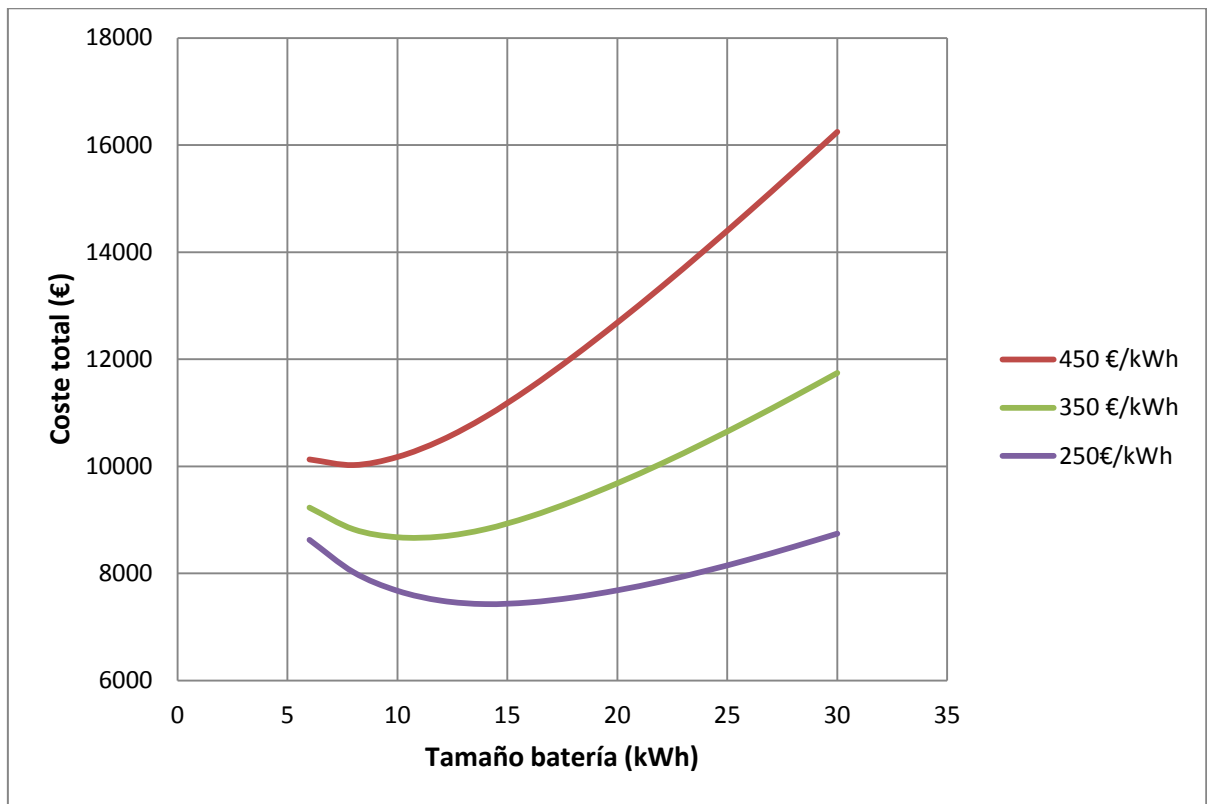


Figura 30. Coste total vehículo urbano.

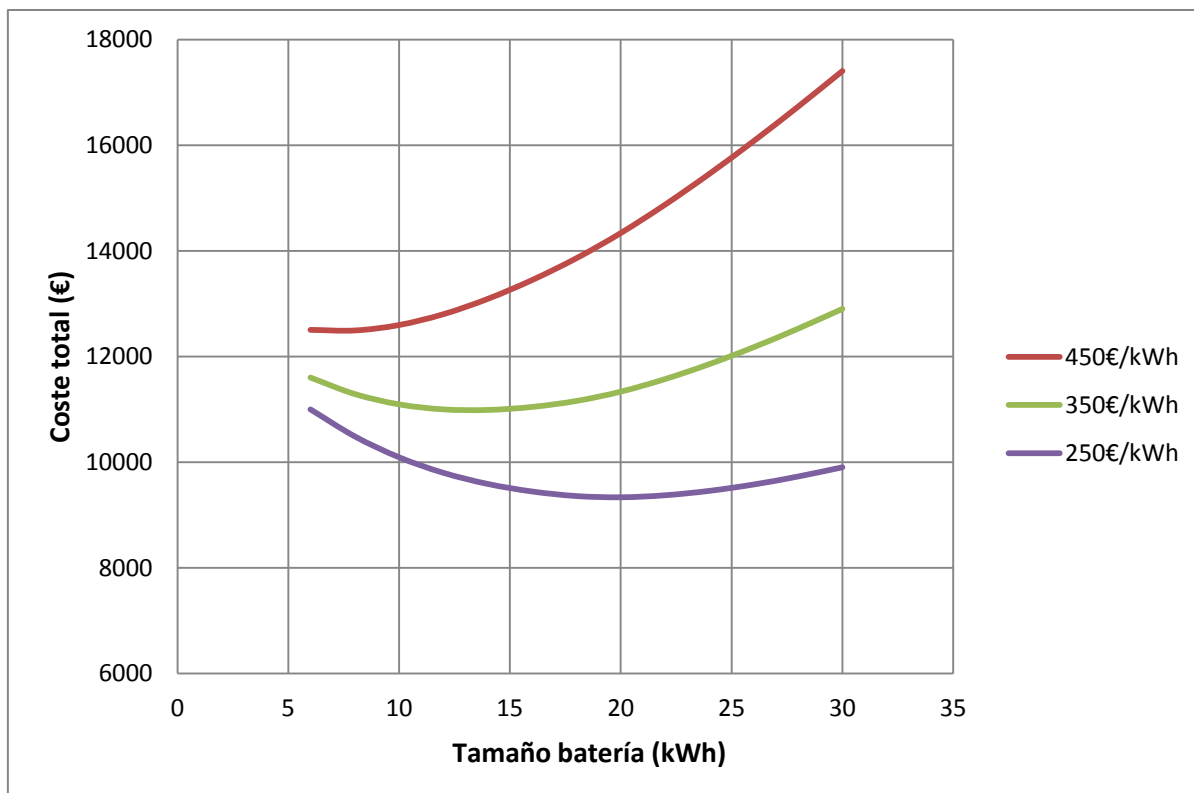


Figura 31. Coste total vehículo uso general.

Atendiendo a las Figuras Figura 30 y Figura 31 y si consideramos 350 €/kWh como un nivel de precio realista para la batería en un futuro cercano esto no da unos tamaños óptimos de batería de unos 11 kWh para el vehículo urbano y de algo menos de 15 kWh para el vehículo de uso general. Los tamaños de batería que optimizan el coste total de propiedad del vehículo son aquellos que consiguen sustituir entre un 60% y un 70% del total de kilómetros recorridos por kilómetros conducidos eléctricamente, no siendo rentable remplazar más del 80% en ningún escenario de precios.

Además de los resultados concretos, varias conclusiones pueden ser derivadas de las figuras anteriormente mostradas. La primera y más obvia es el aumento del tamaño óptimo de batería al reducir el precio por kWh de la batería. Esto se debe a que si el coste del kWh disminuye es posible amortizar mayores tamaños de batería con el futuro ahorro en el coste de operación. En segundo lugar si comparamos los tamaños óptimos para ambos vehículos se observa que el vehículo de uso general siempre presenta tamaños óptimos de batería mayores que el vehículo urbano. Debido al mayor porcentaje de viajes de media distancia realizados por el vehículo de uso general resulta económico aumentar el tamaño de batería para captar esos viajes y reducir el uso de combustible así como el coste de operación.

Otra importante observación es la necesidad de que el precio de las baterías se reduzca hasta niveles de por debajo de 400 €/kWh. Tanto en la Figura 30 (vehículo urbano) como en la Figura 31 (vehículo uso general) se observa que cuando el precio de la batería se encuentra en niveles de 450€/kWh el óptimo tienden a tamaños de batería muy pequeños, que no resultarían atractivos en el mercado debido a su limitado rango eléctrico y con los cuales sería difícil vender el vehículo como “eléctrico la mayoría de días”.

No se debe olvidar que aunque los tamaños de batería propuestos son los que minimizarían el coste total de propiedad del vehículo existen otros factores que pueden influir en el proceso de decisión a la hora de adquirir un vehículo. En primer lugar existe una diferencia de percepción por parte del usuario entre el coste inicial y el coste de operación del vehículo. Diferentes estudios afirman que los usuarios están dispuestos a pagar un extra coste al comprar su vehículo si este coste adicional es amortizado entre los 3 y 5 primeros años de vida del vehículo, cuando la vida útil de un automóvil en la gran mayoría de ocasiones supera los 10 años [19]. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Un segundo factor que juega en la dirección opuesta es que un mayor rango eléctrico puede ser considerado por muchos usuarios como un vehículo con unas mejores prestaciones o un vehículo de mayor calidad. Es posible que un menor rango eléctrico (menor batería) y por lo tanto un menor precio del vehículo minimizase su coste total de propiedad, sin embargo, al igual que ocurre hoy en día con vehículos de alta potencia, es posible que hubiese clientes dispuestos a pagar ese sobreprecio por tener un producto considerado mejor. Mediante estudios de mercado sería necesario investigar qué cantidad adicional están los clientes preparados para pagar por un mayor rango eléctrico y si esa cantidad es suficiente para hacer el producto rentable al fabricante.

7. Consumos de combustible y autonomía.

En esta sección se van a presentar los consumos de combustible cuando el vehículo opera en modo mantenimiento de carga (únicamente gasolina) y el consumo energético y rango eléctrico cuando se utiliza únicamente la energía proveniente de la batería. Por último se presentaran valores de consumo de combustible total en homologación. Ambos consumos han sido calculados para distintos ciclos de conducción. Además del NEDC se han simulado otros 5 ciclos de conducción ARTEMIS cubriendo el espectro de velocidades medias de conducción.

Los vehículos seleccionados han sido:

- Volvo C30: Batería 14 kWh, Extensor de Rango 35 Kw.
- Mini: Batería 11 kWh, Extensor de Rango 15 kw.

7.3 Consumo combustible en modo mantenimiento de carga (l/100km)

Ciclos de conducción	Volvo C30	Mini
NEDC	3.73	3.88
Artemis Urban	3.58	3.72
Artemis Road	3.53	3.65
Artemis motorway	5.5	-----
Artemis9	4.97	-----
Artemis12	6.04	-----

Tabla 4. Consumo combustible en modo mantenimiento de carga (l/100 km)

En la Tabla 4 se puede observar como los consumo de combustible en modo mantenimiento de carga son muy contenidos. En el caso del Volvo C30 se consigue un consumo de 3.73 l/100km en el NEDC. Este consumo es comparable al obtenido por un vehículo diesel actual de las mismas características. Sin embargo a medida que los ciclos de conducción son más rápidos (Artemis motorway, Artemis 12) el consumo de combustible aumenta considerablemente, registrando peores valores de consumo que los que obtendría un vehículo convencional.

El en caso del Mini no se han registrado los valores de consumo de combustible para los 3 ciclos de conducción más rápidos ya que el tamaño del Extensor de Rango no permite mantener el nivel de carga en esos ciclos de conducción. La razón de porque el Mini registra peores valores de consumo que el Volvo C30, aun siendo el primero un vehículo más ligero, reside en los peores rendimientos de unos RE y baterías más pequeños.

7.4 Consumo energético en modo puramente eléctrico (kWh/km) → Rango eléctrico (km)

Ciclos de conducción	Volvo C30	Mini
NEDC	0.1368 (66.8)	0.1464 (49.3)
Artemis Urban	0.1213 (73.8)	0.1355 (53.3)
Artemis Road	0.1190 (75.2)	0.1360 (53.1)
Artemis motorway	0.2121 (47.7)	0.2180 (33.1)
Artemis9	0.1897 (53.3)	0.1924 (37.5)
Artemis12	0.2296 (44.0)	0.2337 (30.9)

Tabla 5. Consumo energético (kWh/km) y rango eléctrico (km) en modo puramente eléctrico.

En la Tabla 5 se puede observar como el consumo energético y por lo tanto el rango eléctrico varía considerablemente dependiendo del ciclo de conducción. Mientras que en un ciclo totalmente urbano como el Artemis Urban se pueden alcanzar rangos eléctricos de más de 70 km con una batería de 14 kWh, este se ve reducido a menos de 50 km en ciclos de conducción más rápidos como el Artemis Motorway.

Por ello sería recomendable que el lugar de facilitar un único valor de rango eléctrico, el propio fabricante facilitase un rango de valores entre los que la autonomía del vehículo puede variar según las condiciones de conducción. Esto ayudaría al usuario a entender el producto y no sentirse engañado cuando el vehículo no alcanzase el rango eléctrico anunciado.

7.5 Consumo combinado. Procedimiento Europeo híbridos.

Los valores de consumo de combustible y consumo energético presentados en las secciones 7.3 y 7.4 representan los consumos que presentarían ambos vehículos en ambos modos de funcionamiento. Sin embargo el procedimiento de homologación europeo proporciona un solo dato de consumo ponderado (además del rango eléctrico). Este consumo de combustible es calculado como:

$$FC = \frac{FC_{CS} \cdot D_{AV} + FC_{CD} \cdot D_E}{D_E + D_{AV}}$$

Donde:

FC= Consumo combustible.

FC_{CS}= Consumo de combustible en modo mantenimiento de carga. Batería descargada a su mínimo nivel.

FC_{CD}= Consumo de combustible en modo eléctrico. Batería cargada completamente.

D_E= Rango eléctrico del vehículo (km).

$D_{AV} = 25$ km (distancia media recorrida en combustible entre dos recargas de la batería).

Ya que para un REV el consumo de combustible en modo eléctrico es cero, la ecuación queda como:

$$FC = \frac{FC_{CS} \cdot D_{AV}}{D_E + D_{AV}} = \frac{25}{D_E + 25} \cdot FC_{CS}$$

Donde el cociente $\frac{25}{D_E + 25}$ representa la fracción de kilómetros recorridos con combustible asumiendo que como valor promedio entre dos recargas se recorren 25 km haciendo uso de combustible. Todos los detalles del procedimiento de homologación europeo pueden consultados en el reglamento UN ECE R101 [16].

Utilizando los valores de consumo de combustible y rango eléctrico mostrados en las Tablas Tabla 4 Tabla 5 para el NEDC los consumos de combustible ponderados para ambos vehículo en homologación serían los siguientes:

$FC_{Volvo} = 1.02$ l/100 km

$FC_{Mini} = 1.3$ l/100 km

Se puede observar que consumos homologados de 1l/100 km pueden ser fácilmente obtenidos con rangos eléctricos cercanos a 70 km. Anunciar vehículos con un consumo de combustible de 1l/100km, o justo por debajo de este valor, puede ser un buen argumento de venta para los fabricantes, y posiblemente una razón para ajustar el tamaño de batería (rango eléctrico) a los valores necesarios para alcanzar esa sorprendente cifra de consumo. Sin embargo, aunque es el consumo de combustible que el vehículo podría llegar a tener en toda la distancia recorrida (contando también los kilómetros eléctricos), este dato no ayuda a comprender el consumo real del vehículo en los distintos modos de conducción. Esto puede llevar a confusión por parte del usuario cuando descubra que el consumo de combustible cuando el vehículo circula haciendo uso únicamente de este es considerablemente mayor que el homologado.

El procedimiento para homologar el consumo de vehículos híbridos enchufables en los Estados Unidos es distinto y le aporta una mayor cantidad de información para comparar y entender cuál es el consumo en los distintos modos de operación del vehículo. Al contrario que en el reglamento Europeo que solo suministra un valor ponderado del consumo de automóvil, el reglamento estadounidense presenta consumos en ambos modos de conducción, el rango eléctrico del vehículo además de otras indicaciones sobre coste y ahorro de combustible y emisiones. La EPA (Environmental Protection Agency) es la encargada de llevar a cabo las homologaciones y provee a los nuevos vehículos vendidos con una pegatina (Figura 32) que contiene toda la información acerca del consumo e eficiencia energética del vehículo.



Figura 32. Pegatina de la EPA para PHEV.

8. Comparación entre BEVs y REVs

Como ha sido mencionado en varias ocasiones durante la discusión, debido al alto peso y coste de las baterías parece razonable adaptar el tamaño de la batería a la típica distancia recorrida diariamente, mientras que los para los viajes más largos que el rango eléctrico del vehículo disponemos de un motor combustión/generador con el que recargar las baterías y continuar el trayecto. Sin embargo es importante no olvidar que el coste del RE debe ser añadido al coste total de un vehículo completamente eléctrico (con unas menores baterías). El atractivo de este tipo de vehículos en comparación con los vehículos puramente eléctricos reside en que el RE sea significativamente mejor en términos de coste, peso y volumen y funcionalidad que las baterías a las que reemplaza. En términos de peso y volumen el extensor de rango iguala a las baterías, mientras que en funcionalidad (autonomía, tiempo de recarga) mejora sustancialmente a las baterías que reemplaza.

Durante el proyecto FUEREX ha sido estimado que el coste del extensor de rango para una producción de aproximadamente 500.000 motores/año debería ser de 2500 € para el sistema completo (motor combustión, generador, electrónica de potencia y tanque de combustible). La tecnología de motores, a diferencia de la de baterías, es una tecnología madura y por lo tanto no es probable que su coste disminuya dramáticamente en los próximos años. La Tabla 6 muestra cuantos kWh podrían ser añadidos si invertimos el coste del extensor de autonomía en baterías adicionales en función del precio del kWh.

Precio batería (€/kWh)	850	750	650	550	450	350	250	150
kWh adicionales	2,94	3,33	3,85	4,55	5,56	7,14	10,00	16,67

Tabla 6. kWh extra.

En la tabla anterior se puede observar que incluso si el precio de las baterías se reduce a valores de 250 €/kWh, con el precio estimado de 2500€ para el extensor de rango esto solo sería suficiente para 10 kWh adicionales en baterías. Esto significa que un REV de 16 kWh sería comparable en precio inicial con un BEV de 26 kWh. Sin embargo la funcionalidad de ambos vehículos no es comparable, ya que el BEV dispondría de una autonomía de unos 180 km en condiciones favorables (pudiéndose disminuir hasta poco más de 100 km) mientras que para el REV la autonomía no representa un problema al poder hacer uso del motor/generador los viajes que excedan la autonomía eléctrica.

Sin embargo es posible que para ciertos conductores la autonomía que ofrece un BEV sea suficiente para satisfacer sus necesidades de transporte, ya que debido al uso que le dan al vehículo no necesitan disponer de mayor autonomía. Así se plantea la siguiente pregunta:

¿Para cuantos conductores un vehículo puramente eléctrico podría ser su primer y único vehículo disponible?

Para tratar de responder esta pregunta se ha vuelto a hacer uso de la base de datos disponible. Para cada vehículo dentro de la base de datos se ha calculado que tamaño de batería se hubiese necesitado para completar todos los viajes realizados. Con esta información se ha construido la Figura 33 que muestra que porcentaje de los conductores totales podrían haber

realizado sus viajes con un determinado tamaño de batería. El enfoque en este caso es necesariamente distinto al tomado hasta ahora, ya no es posible tomar estadísticas de grupos de conductores, sino que es necesario fijar la atención en cada conductor por separado y estudiar sus necesidades individuales.

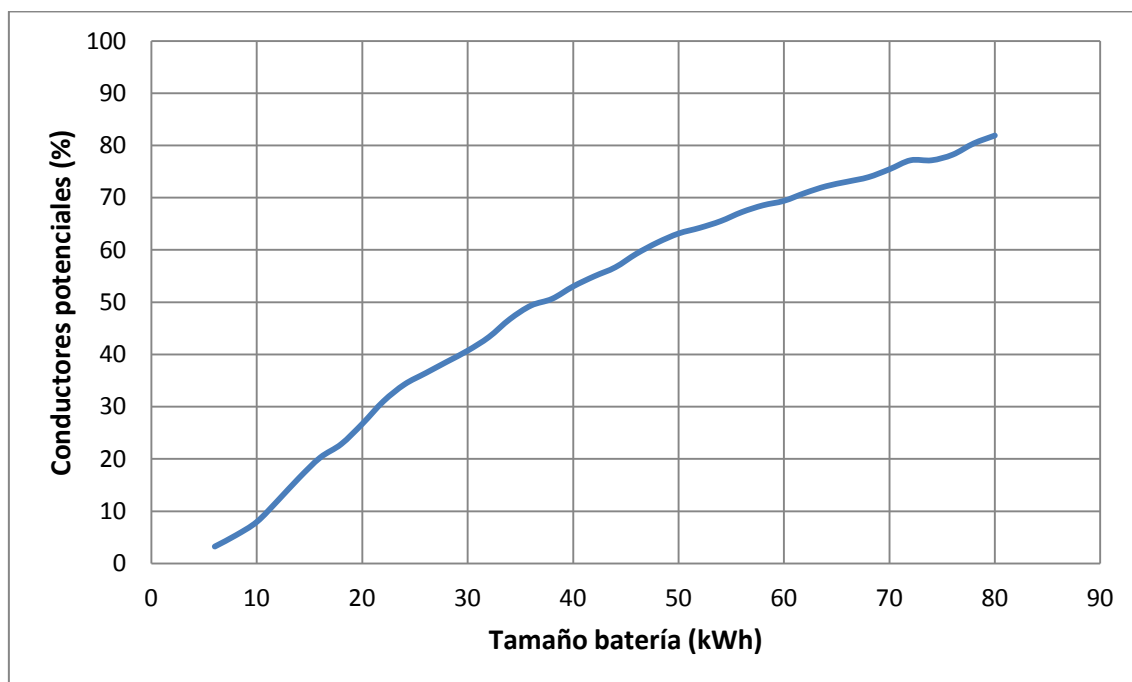


Figura 33. Potenciales usuarios de un vehículo eléctrico.

La anterior Figura 33 representa el número de conductores de la base de datos para los que un BEV con un determinado tamaño de batería les hubiese sido suficiente para satisfacer sus necesidades de transporte, sin embargo eso no significa que estos consideraran suficiente el rango eléctrico del vehículo. En primer lugar la base de datos es limitada y es posible que no haya captado todas las necesidades del conductor, en segundo lugar el llamado “Range Anxiety” hace que la autonomía demandada por los usuarios será mayor que la realmente necesitan, ya que estos quieren tener la seguridad de que el rango eléctrico del vehículo es suficiente si hay algún imprevisto. Atendiendo únicamente a los viajes que los distintos conductores realizaron los vehículos actuales solo son válidos para aproximadamente un 35% de conductores. Este valor se reducirá considerablemente debido a los viajes no captados (cada conductor ha sido seguido por no más de dos meses) y debido a la percepción de los conductores de necesitar más rango eléctrico del que realmente utilizan.

El principal problema que presentan los vehículos eléctricos actuales es que no cubren el 100% de necesidades de transporte de un usuario medio, y por lo tanto esto puede reducir su penetración en el mercado significativamente. Por esa razón los vehículos eléctricos sin extensor de autonomía solo serán capaces de reemplazar aquellos vehículos que son utilizados exclusivamente para trayecto cortos y conocidos, quedando reducido su uso a entornos urbanos o aplicaciones concretas, los que representan un segmento relativamente pequeño del mercado. En otras palabras, a medio plazo es probable que los vehículos eléctricos consigan convertirse en el segundo vehículo del hogar, así como vehículos para flotas, mientras que raramente serán el primer o único coche de la familia. Los REVs sin embargo,

presentan una autonomía ilimitada y por lo tanto son validos para un mayor segmento de mercado aun cuando el extensor de rango solo será importante en un pequeño porcentaje de viajes. Los REV o PHEV también solucionan el problema de la falta de infraestructura, ya que estos vehículos no son tan dependientes de la implantación de una infraestructura de recarga para su introducción en el mercado, ya que disponen de una fuente adicional de energía (combustible) para los viajes que excedan el rango eléctrico del vehículo.

9. Conclusiones y líneas futuras

9.3 Conclusiones

La electrificación del automóvil diversificará considerablemente la variedad de tecnologías de propulsión. Mientras que con el vehículo de combustión convencional una única solución técnica puede ser válida para una gran cantidad de aplicaciones, la baja densidad energética y alto coste de las baterías requiere una optimización específica para cada aplicación. El proceso de electrificación está siendo y será progresiva, comenzando con pequeñas hibridaciones con las que disminuir consumos (manteniendo prestaciones), pasando por PHEV y REV los cuales ya disponen de una conexión directa a la red eléctrica para finalizar con los BEV. De esta manera los distintos conceptos eléctricos junto con el vehículo de combustión convencional compartirán cuotas de mercado durante un importante periodo de tiempo.

En este estudio en concreto se ha mostrado que la solución al problema de encontrar el tamaño de batería óptimo para REV no es única. Para poder satisfacer a distintos tipos de conductores será necesario ofertar, incluso dentro de un mismo modelo, distintos tamaños de batería que se adecuen a las necesidades de los distintos compradores potenciales. El tamaño del extensor de rango también deberá ser cuidadosamente ajustado para satisfacer las prestaciones esperadas por el conductor. Así como el problema de encontrar el tamaño de batería se puede plantear como una optimización de costes, la elección del extensor de rango debe ser entendida más como un compromiso entre las prestaciones del vehículo en largos recorridos y el coste del propio RE. Potencias demasiado ajustadas del RE podrían provocar situaciones en las que el conductor vería limitadas las prestaciones de su vehículo, pudiendo crear una gran insatisfacción y rechazo hacia el producto. Por ello la recomendación de este estudio es el optar por un RE ligeramente sobredimensionada que asegure unas buenas prestaciones en toda situación, al menos hasta que se pueda conocer con mayor exactitud el uso que los conductores hacen de este tipo de vehículo.

Durante el proyecto se ha comprobado además el potencial que tienen estos vehículos para aunar las ventajas de vehículos eléctricos y convencionales. Los REV son capaces de reducir el consumo de combustible respecto a un vehículo convencional en aproximadamente un 70%, manteniendo la funcionalidad y prestaciones de un vehículo convencional. Es precisamente la funcionalidad (autonomía) lo que convierte a este tipo de vehículos en una opción más atractiva para un mayor número de usuarios en comparación con el vehículo eléctrico puro. El rango eléctrico de los vehículos eléctricos actuales no se ajusta al uso que los conductores dan a su vehículo o incluso más importante, al rango que los conductores esperan de un vehículo basándose en los bien conocidos vehículos de combustión actuales. Sin embargo es difícil predecir como los patrones de conducción y el uso que se le da a los vehículos se verán influenciados en un futuro por factores sociales y económicos. Nuevos estilos de vida y comportamientos sociales pueden cambiar la forma en que usemos nuestros vehículos y por lo tanto las demandas que tengamos sobre ellos.

9.4 Líneas futuras

Para un mejor conocimiento de mercado y de los conductores sería necesario ampliar el estudio a distintas zonas geográficas, investigando las diferencias en los patrones de conducción entre distintos países. Así mismo sería de gran interés estudiar las diferencias en los patrones de conducción entre distintos tipos de vehículos y vehículos situados en diferentes áreas, como zonas urbanas y entornos rurales. Esto proporcionaría un mejor entendimiento de los conductores lo que podría derivar en productos mejor adaptados a las necesidades de cada consumidor. Para ello es necesario la realización de bases de datos más amplias y representativas, y en la medida de lo posible de dominio público, para que tanto empresas del sector, como institutos de investigación y universidades pudieran hacer uso de ellas y de esta manera diseñar vehículos e infraestructuras de recarga adecuadas a las necesidades de los usuarios. El estudio también podría ser ampliado analizando la influencia que el previsible aumento del precio de los combustibles, la cantidad de kilómetros recorridos anualmente o el periodo de amortización tendrían en el tamaño óptimo de la batería y en la futura aceptación de estos vehículos.

Desde el punto de vista del fabricante, un estudio incluso más interesante sería calcular cuales serían los tamaños de batería (dado un número limitado de opciones) que maximizarían la satisfacción del cliente o el beneficio de la empresa. La diferencia con el estudio realizado recaería en que el proceso de definición de los nichos de mercado sería simultáneo (no serían definidos con anterioridad) y la optimización calcularía al mismo tiempo que vehículos y para que usuarios se minimiza el coste total de propiedad. Analizando los resultados sería posible identificar para que grupo de conductores sería adecuado cada vehículo y los patrones de conducción y posible características compartidas que definen a ese grupo de conductores (distancia recorrida diariamente, tipo de vehículo, localización del vehículo... etc.).

Por último, un punto que queda fuera del alcance de este proyecto, pero que es de vital importancia para la introducción de estos vehículos, es la educación e información de los clientes por parte de los fabricantes e instituciones competentes. Los potenciales usuarios deben conocer el producto y entenderlo para poder elegir el vehículo que más se adecua a sus necesidades. Con el fin determinar el tamaño de batería que mejor se adecua a cada cliente sería interesante desarrollar una pequeña herramienta con la que los usuarios pudieran determinar cual es el vehículo que mejor se adapta a sus necesidades.

10. Bibliografía

- [1] [http://ec.europa.eu/transport/strategies/consultations/doc/2009_03_27_future_of_transport/20090408_eabev_\(scientific_study\).pdf](http://ec.europa.eu/transport/strategies/consultations/doc/2009_03_27_future_of_transport/20090408_eabev_(scientific_study).pdf)
- [2] <http://latestinfographics.com/infographics/electric-vehicles-ranking-co2-emissions.jpg>
- [3] <http://www.fuerex.eu/>
- [4] L. Guzzella, A. Sciarretta, Vehicle propulsion systems, introduction to modeling and optimization, 2nd Edition, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [5] Summary of Travel Trends: 2009 National Household Travel Survey, Tech. rep., United States Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2009. Available: <http://nhts.ornl.gov/index.shtml>. [Accessed: October 06, 2011].
- [6] Test Site Sweden: <http://www.testsitesweden.com/>
- [7] André M. The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Sci Total Environ* 2004;334–335:73–84.
- [8] <http://www.inrets.fr/ur/lte/publi-autresactions/fichesresultats/ficheartemis/artemis.html>
- [9] Murgovski, N. Component sizing of a plug-in hybrid electric powertrain via convex optimization.
- [10] Murgovski, N. Convex Optimization of Charging Infrastructure Design and Component Sizing of a Plug-in Series HEV Powertrain.
- [11] Volts Stats web page: <http://www.voltstats.net/>
- [12] http://www.chevrolet.com/volt-electric-car.html?cmp=OLA_BRAND_6660581_0
- [13] Boston Consulting Group. Batteries For Electric Cars: Challenges, Opportunities and the outlook to 2020. [En línea] <http://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>
- [14] Battery cost 2020. <http://green.autoblog.com/2012/04/06/lithium-ion-battery-costs-will-still-be-about-400-kwh-by-2020/>
- [15] Predicciones coste batería. <http://www.plugincars.com/elusive-real-battery-costs-120698.html>
- [16] <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r101r2e.pdf>
- [17] Fraidl, G., Beste, F., Kapus, P., Korman, M. et al., "Challenges and Solutions for Range Extenders – From Concept Considerations to Practical Experiences," SAE Technical Paper 2011-37-0019, 2011.
- [18] Kromer, M. and Heywood, J., "A Comparative Assessment of Electric Propulsion Systems in the 2030 US Light-Duty Vehicle Fleet," *SAE Int. J. Engines* 1(1):372-391, 2009, doi:10.4271/2008-01-0459.
- [19] Lee, H. Will electric car transform the U.S vehicle market? [En línea] <http://belfercenter.ksg.harvard.edu/files/Lee%20Lovellette%20Electric%20Vehicles%20DP%202011%20web.pdf>